

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту
Кафедра електропостачання

«На правах рукопису»
УДК 621.31

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ В.А. Попов
«__» _____ 20__р

Магістерська дисертація

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

спеціалізації Енергетичний менеджмент та енергоефективність

на тему: «Підвищення енергетичної ефективності системи
постачання стисненого повітря (на прикладі хімічного підприємства)»

Виконав (-ла): студент (-ка) VI курсу, групи ОН-71мп

Попович Марина Петрівна _____

Науковий керівник к.т.н., доц. Бориченко О.В. _____

Консультант нормоконтроль ас. Прокопенко І.Д. _____

Рецензент к.т.н. доц. В.В. Дубровська _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2018 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут енергозбереження та енергоменеджменту
Кафедра електропостачання

Інститут/факультет Інститут енергозбереження та енергоменеджменту
(повна назва)

Кафедра електропостачання _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Спеціалізація «Енергетичний менеджмент та енергоефективність»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Науковий керівник кафедри

_____ С.П. Денисюк

« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Попович Марині Петрівні

-
1. Тема дисертації «Підвищення енергетичної ефективності системи постачання стисненого повітря (на прикладі хімічного підприємства)»
науковий керівник дисертації к.т.н., доц. Бориченко О.В.
затверджені наказом по університету від «05» листопада 2018 р. № 4089-с
 2. Строк подання студентом дисертації 10 грудня 2018 року
 3. Об'єкт дослідження: процес постачання стисненого повітря на хімічному підприємстві.
 4. Вихідні дані: дані обліку енергоресурсів; параметри системи стисненого повітря; літературні джерела за темою дисертації
 5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - проаналізувати та дослідити сучасні заходи з підвищення рівня енергоефективності системи стисненого повітря на хімічному підприємстві;

- проаналізувати та розрахувати параметри системи стисненого повітря на підприємстві і вивчити технологічний процес виробництва стисненого повітря;
 - вибрати та обґрунтувати можливі заходи з енергозбереження для системи постачання стисненого повітря;
 - оцінити та проконтролювати рівень енергоефективності системи стисненого повітря шляхом встановлення базового рівня енергоспоживання та визначення показників енергоефективності
 - розробити стартап-проект за результатами дослідження.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація
7. Орієнтовний перелік публікацій: доповідь, що опублікована в збірнику матеріалів I Науково-технічної конференції магістрантів ІЕЕ, присвяченій 120-річчю КІІ Зм.. Ігоря Сікорського 21 листопада 2018 року.
8. Консультанти розділів дисертації
Нормоконтроль *ас. Прокопенко І.Д.*
9. Дата видачі завдання 18 квітня 2018 року.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз та дослідження сучасних заходів з підвищення рівня енергоефективності системи постачання стисненого повітря на хімічному підприємстві.	01.02.18-31.05.18	
2	Аналіз та розрахунок системи постачання стисненого повітря аміачного цеху на хімічному підприємстві та дослідження технологічного процесу виробництва стисненого повітря.	01.06.18-30.08.18	
3	Вибір та обґрунтування можливих заходів з енергозбереження для системи постачання стисненого повітря.	01.09.18-01.11.18	
4	Оцінка та контроль рівня енергоефективності системи стисненого повітря шляхом встановлення базового рівня енергоспоживання.	02.11.18-25.11.18	
5	Розроблення стартап-проекту.	26.11.18-07.12.18	

Студент

(підпис)

М.П. Попович

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

О.В. Бориченко

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Структура і обсяг роботи. Магістерська дисертація на тему: «Підвищення енергетичної ефективності системи постачання стисненого повітря (на прикладі хімічного підприємства)» складається із вступу, 4 розділів, висновків та переліку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 109 сторінок основного тексту, в тому числі 10 рисунків, 28 таблиць та 42 бібліографічних найменувань за переліком посилань.

Актуальність теми. На сьогодні проблема енергозбереження в Україні є дуже актуальною. Метою діяльності у цій сфері є забезпечення раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів при існуючому рівні розвитку техніки та технологій. Найбільший потенціал економії енергоресурсів в Україні зосереджений в промисловій галузі, тому підвищення рівня енергоефективності промислових підприємств дозволить зменшити залежність України від імпорту енергоресурсів та підвищити рентабельність продукції. Виробництво та постачання стисненого повітря є одними з найбільш енергоємних процесів промисловості, що вказує на гостру необхідність вирішення проблеми енергозбереження саме в цій сфері.

Для того, щоб впевнитись в ефективності впровадження заходів з підвищення рівня енергоефективності та відслідкувати економію в результаті їх реалізації необхідний контроль з використанням відповідних методів. Саме тому постійний контроль рівня енергоефективності є невід'ємною частиною управління системами постачання стисненого повітря.

Метою магістерської дисертації є підвищення ефективності використання електричної енергії в системі постачання стисненого повітря аміачного цеху хімічного підприємства.

Для досягнення зазначеної мети дослідження були вирішені наступні завдання:

- аналіз та дослідження сучасних заходів з підвищення рівня енергоефективності системи постачання стисненого повітря на хімічному підприємстві;
- аналіз та розрахунок системи постачання стисненого повітря аміачного цеху на хімічному підприємстві та дослідження технологічного процесу виробництва стисненого повітря;
- вибір та обґрунтування можливих заходів з енергозбереження для системи постачання стисненого повітря;
- оцінка та контроль рівня енергоефективності системи стисненого повітря шляхом встановлення базового рівня енергоспоживання;
- розроблення стартап-проекту за результатами дослідження.

Об'єктом дослідження є процес постачання стисненого повітря на хімічному підприємстві.

Предметом дослідження є методи та заходи підвищення енергоефективності використання електричної енергії в системах постачання стисненого повітря.

Методи дослідження. В роботі використовувались теоретичні методи та експериментальні дослідження, які полягають в проведенні аналізу тенденції зміни обсягів споживання електроенергії після впровадження заходів з підвищення рівня енергоефективності. Методичною основою дисертаційного дослідження є методи вибору впливових факторів та встановлення базового рівня споживання електроенергії, а саме: експертне оцінювання та регресійний аналіз.

Наукова новизна одержаних результатів. Удосконалено підхід до підвищення ефективності використання електричної енергії в системі постачання стисненого повітря аміачного цеху, який враховує оцінювання та контроль досягнутого рівня енергоефективності після впровадження заходів з енергозбереження.

Практичне значення роботи. Впровадження запропонованих заходів з енергозбереження дасть можливість на практиці подолати основні проблеми щодо

нераціонального використання електричної енергії в системах стисненого повітря. Аналіз зазначеного досвіду сприятиме вирішенню проблем енергоефективності на промислових об'єктах.

Апробація результатів роботи відбулася на I Науково-технічній конференції магістрантів ІЕЕ, присвяченій 120-річчю КПІ ім. Ігоря Сікорського 21 листопада 2018 року.

Публікації: доповідь, що опублікована в збірнику матеріалів I Науково-технічної конференції магістрантів ІЕЕ, присвяченій 120-річчю КПІ ім. Ігоря Сікорського 21 листопада 2018 року.

Для виконання розрахунків у другому та третьому розділі магістерської дисертації використовувалось наступне програмне забезпечення: MS Word, MS Excel, MS PowerPoint, Mathtype.

Ключові слова: СИСТЕМИ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ, РЕГРЕСІЙНИЙ АНАЛІЗ, ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ, БАЗОВИЙ РІВЕНЬ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ.

ABSTRACT

Structure and scope of work. Master's dissertation on "Improving the energy efficiency of the supply system of compressed air (on the example of a chemical enterprise)" consists of an introduction, 4 chapters, conclusions and a list of sources used. The total volume of work is 109 the pages of the main text, including 10 figures, 28 tables and 42 bibliographic titles in the list of references.

Actuality of theme. Today the problem of energy saving in Ukraine is very topical. The purpose of the activity in this area is to ensure the rational use of fuel and energy resources at the existing level of development of technology and technology. The greatest potential of energy saving in Ukraine is concentrated in the industrial sector, therefore increasing the level of energy efficiency of industrial enterprises will reduce Ukraine's dependence on energy imports and increase the profitability of products. Production and supply of compressed air are among the most energy-intensive industrial processes, which indicates the urgent need to solve the problem of energy saving precisely in this area.

In order to verify the effectiveness of implementing measures to increase energy efficiency and track the savings as a result of their implementation, control is required using appropriate methods. That is why continuous monitoring of energy efficiency is an integral part of the management of compressed air supply systems.

The purpose of the master's thesis is to increase the efficiency of the use of electric energy in the system of supply of compressed air to the ammonia shop of the chemical enterprise.

To achieve this goal, the following tasks were solved:

- analysis and research of modern measures for increasing the energy efficiency of the compressed air supply system at the chemical enterprise;
- analysis and calculation of the system of supply of compressed air of the ammonia shop at the chemical enterprise and research of the technological process of compressed air production.

- selection and justification of possible energy saving measures for the system of supply of compressed air;
- assessment and control of the energy efficiency of the compressed air system by establishing a basic level of energy consumption and
- development of a startup project based on research results.

The object of the research is the process of supplying compressed air to a chemical plant

The subject of the study is the methods and measures for improving the energy efficiency of the use of electric energy in compressed air supply systems.

Research methods. In the work, theoretical methods and experimental research were used, which consist in conducting an analysis of the trend of changes in the volume of electricity consumption after the introduction of measures to increase energy efficiency. The methodical basis of the dissertation research is the methods of choosing influential factors and establishing the basic level of electricity consumption, namely: expert evaluation and regression analysis.

The scientific novelty of the obtained results. The approach to increasing the efficiency of electric energy use in the compressed air supply system of the ammonia shop has been improved, which takes into account the assessment and control of the achieved level of energy efficiency after the implementation of energy saving measures.

Practical value of work. Implementation of the proposed energy saving measures will enable in practice to overcome the main problems with irrational use of electric energy in compressed air systems. The analysis of this experience will help solve energy efficiency problems at industrial sites.

Approval of the results of work took place at the I Scientific and Technical Conference of IEE Masters, dedicated to the 120th anniversary of the KPI of Igor Sikorsky on November 21, 2018.

Publications: a report published in the collection of materials I of the Scientific and Technical Conference of CEE Masters, devoted to the 120th anniversary of the KPI of Igor Sikorsky on November 21, 2018.

To perform calculations in the second and third sections of the master's thesis, the following software was used: MS Word, MS Excel, MS PowerPoint, Mathtype .

Keywords: COMPRESSED AIR SYSTEMS, REGRESSION ANALYSIS, ENERGY EFFICIENCY, ELECTRICITY CONSUMPTION, ENERGY CONSERVATION, BASIC ENERGY CONSUMPTION

ЗМІСТ

ВСТУП.....	12
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В СИСТЕМАХ ПОСТАЧАННЯ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ	15
1.1 Загальна характеристика систем стисненого повітря	15
1.2 Схеми постачання стисненого повітря.....	18
1.3 Основні методи підвищення енергетичної ефективності систем стисненого повітря	22
1.3.1 Оптимізація загального устрою системи	24
1.3.2 Використання двигунів зі змінною швидкістю	26
1.3.3 Високоєфективні електродвигуни	28
1.3.4 Централізована система управління системою стисненого повітря.....	29
1.3.5 Утилізація теплоти	31
1.3.6 Зменшення витоків в системах стисненого повітря	32
1.3.7 Оптимізація тиску системи	34
Висновки до розділу.....	35
2 АНАЛІЗ ТА РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ АМІАЧНОГО ЦЕХУ НА ХІМІЧНОМУ ПІДПРИЄМСТВІ	37
2.1. Дослідження технологічного процесу виробництва стисненого повітря.	37
2.2 Розрахунок параметрів системи стисненого повітря.....	39
2.2.1 Визначення витрат на КВПіА	39
2.2.2 Конструктивний розрахунок повітропроводів.....	42
2.2.3 Визначення втрат тиску на всіх ділянках схеми повітропостачання.....	44
2.2.4 Узгодження тисків у вузлових точках.....	47
2.2.5 Визначення кількості води для охолодження компресора	47
2.2.6 Визначення питомих витрат енергії на виробництво стисненого повітря.	53
2.3 Вибір та обґрунтування можливих заходів енергозбереження для системи стисненого повітря.	55

2.3.1	Заміна редуктора в системі двигун-компресор	56
2.3.2	Використання холодного зовнішнього повітря для живлення компресора.....	58
2.3.3	Встановлення сучасного енергоефективного електродвигуна з меншою потужністю	60
2.3.4	Утилізація теплоти, яка виділяється при виробництві стисненого повітря	61
2.3.5	Усунення витоків стисненого повітря в системі.....	62
	Висновки до розділу.....	65
3	ОЦІНКА ТА КОНТРОЛЬ РІВНЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ПОСТАЧАННЯ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ ШЛЯХОМ ВСТАНОВЛЕННЯ БАЗОВОГО РІВНЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ	66
3.1.	Побудова систем контролю і планування споживання електричної енергії	66
3.2	Вибір факторів, які впливають на споживання електричної енергії	69
3.3.	Встановлення базового рівня споживання електричної енергії.....	76
3.4	Побудова довірчого інтервалу до математичної моделі споживання електроенергії	79
3.5.	Контроль рівня ефективності споживання електроенергії.....	83
	Висновки до розділу.....	88
4	РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	90
4.1	Етапи розроблення стартап-проекту	90
4.2	Опис ідеї проекту та визначення загального напрямку використання	91
4.3	Технологічний аудит ідеї проекту	92
4.4	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	93
4.5	Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	99
	Висновки до розділу.....	101
	ВИСНОВКИ	103
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	105

ВСТУП

Актуальність теми. На сьогодні проблема енергозбереження в Україні є дуже актуальною. Метою діяльності у цій сфері є забезпечення раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів при існуючому рівні розвитку техніки та технологій. Найбільший потенціал економії енергоресурсів в Україні зосереджений в промисловій галузі, тому підвищення рівня енергоефективності промислових підприємств дозволить зменшити залежність України від імпорту енергоресурсів та підвищити рентабельність продукції. Виробництво та постачання стисненого повітря є одними з найбільш енергоємних процесів промисловості, що вказує на гостру необхідність вирішення проблеми енергозбереження саме в цій сфері.

Для того, щоб впевнитись в ефективності впровадження заходів з підвищення рівня енергоефективності та відслідкувати економію в результаті їх реалізації необхідний контроль з використанням відповідних методів. Саме тому постійний контроль рівня енергоефективності є невід'ємною частиною управління системами постачання стисненого повітря.

Метою магістерської дисертації є підвищення ефективності використання електричної енергії в системі стисненого повітря хімічного підприємства.

Для досягнення зазначеної мети дослідження були вирішені наступні завдання:

- аналіз та дослідження сучасних заходів з підвищення рівня енергоефективності системи постачання стисненого повітря на хімічному підприємстві;
- аналіз та розрахунок системи постачання стисненого повітря аміачного цеху на хімічному підприємстві та дослідження технологічного процесу виробництва стисненого повітря;
- вибір та обґрунтування можливих заходів з енергозбереження для системи постачання стисненого повітря;

- оцінка та контроль рівня енергоефективності системи стисненого повітря шляхом встановлення базового рівня енергоспоживання;
- розроблення стартап-проекту за результатами дослідження.

Об’єктом дослідження є процес постачання стисненого повітря на хімічному підприємстві

Предметом дослідження є методи та заходи підвищення енергоефективності використання електричної енергії в системах постачання стисненого повітря.

Методи дослідження. В роботі використовувались теоретичні методи та експериментальні дослідження, які полягають в проведенні аналізу тенденції зміни обсягів споживання електроенергії після впровадження заходів з підвищення рівня енергоефективності. Методичною основою дисертаційного дослідження є методи вибору впливових факторів та встановлення базового рівня споживання електроенергії, а саме: експертне оцінювання та регресійний аналіз.

Наукова новизна одержаних результатів. Удосконалено підхід до підвищення ефективності використання електричної енергії в системі постачання стисненого повітря аміачного цеху, який враховує оцінювання та контроль досягнутого рівня енергоефективності після впровадження заходів з енергозбереження.

Практичне значення роботи. Впровадження запропонованих заходів з енергозбереження дасть можливість на практиці подолати основні проблеми щодо нераціонального використання електричної енергії в системах стисненого повітря. Аналіз зазначеного досвіду сприятиме вирішенню проблем енергоефективності на промислових об’єктах.

Апробація результатів роботи відбулася на I Науково-технічній конференції магістрантів ІЕЕ, присвяченій 120-річчю КПІ ім. Ігоря Сікорського 21 листопада 2018 року.

Публікації: доповідь, що опублікована в збірнику матеріалів I Науково-технічної конференції магістрантів ІЕЕ, присвяченій 120-річчю КПІ ім. Ігоря Сікорського 21 листопада 2018 року.

Для виконання розрахунків у другому та третьому розділі магістерської дисертації використовувалось наступне програмне забезпечення: MS Word, MS Excel, MS PowerPoint, Mathtype.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В СИСТЕМАХ ПОСТАЧАННЯ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ

1.1 Загальна характеристика систем стисненого повітря

Стиснене повітря являє собою повітря, яке зберігається і використовується під тиском, що перевищує атмосферний. Системи стисненого повітря приймають деяку масу атмосферного повітря, що займає певний об'єм, і стискають її до меншого об'єму. На системи стисненого повітря припадає близько 10% промислового споживання електричної енергії [2].

Згідно з [4] стиснене повітря використовується двома основними способами:

- як компонент технологічного процесу, наприклад, для: виробництва азоту низького ступеня чистоти з метою створення інертної атмосфери для технологічного процесу; виробництва кисню низького ступеня чистоти в якості окислювача, наприклад, при очищенні стічних вод; перемішування при високих температурах, наприклад, розплавленої сталі або скла; видування скляних виробів або витягування волокон; лиття пластмас; пневматичного сортування.
- як енергоносіїв, наприклад, для: приведення в дію інструментів, що працюють на стисненому повітрі; приведення в дію пневматичних пристроїв (наприклад, циліндрів).

На підприємствах стиснене повітря використовується, головним чином, в якості компонента технологічного процесу. Необхідний тиск і чистота повітря, а також часовий графік його споживання визначаються умовами конкретного технологічного процесу.

За своєю природою використання стисненого повітря є чистою та безпечною технологією внаслідок низького ризику займання або вибуху, як самовільного, так і при контакті з гарячими деталями. Внаслідок цього стиснене

повітря широко застосовується на підприємствах, що характеризуються підвищеною небезпекою, наприклад, на хімічних виробництвах. На відміну від систем електропостачання, системи стисненого повітря не вимагають зворотного трубопроводу або кабелю [4].

Система стисненого повітря, незалежно від її конкретного застосування, включає чотири основні підсистеми [4]:

- виробництво стисненого повітря;
- зберігання стисненого повітря;
- підготовка стисненого повітря;
- розподіл стисненого повітря.

Крім цього, до складу системи можуть входити такі допоміжні підсистеми, як, наприклад, утилізація тепла або збір конденсату.

Зазвичай, на промисловому підприємстві встановлено кілька компресорів, єдина система підготовки стисненого повітря і розгалужена розподільна система. Крім того, деякі види обладнання - наприклад, ткацькі або скляні машини - можуть мати вбудовану систему для живлення їх стисненим повітрям. Навіть для конкретних застосувань не існує стандартного проекту системи стисненого повітря. Необхідно підбирати компоненти і забезпечувати їх оптимальну взаємодію в залежності від характеристик конкретного технологічного процесу і умов виробництва [4].

ККД компресора залежить від його типу та конструкції. ККД і, як наслідок, експлуатаційні витрати, є найважливішим фактором при виборі компресора, однак на вибір можуть впливати і інші вимоги, наприклад, щодо кількості та якості стисненого повітря.

За принципом дії компресори підрозділяються на дві основні групи - об'ємні і динамічні компресори [4]. Об'ємні компресори збільшують тиск даної кількості повітря за допомогою зменшення об'єму, яке займає повітря. Цей тип компресорів підрозділяється на дві основні різновиди - поршневі і ротаційні компресори. Динамічні компресори діють за принципом надання швидкості безперервному

потoku повітря, яка потім перетворюється в тиск, як в елементі, що обертається, так і за допомогою нерухомих дифузорів або лопаток.

Зміна об'єму в поршневих машинах здійснюється за рахунок зворотнопоступального руху поршня в циліндрі між двома крайніми положеннями, що виникає за допомогою кривошипно-шатунного механізму від валу, що обертається. У поршневих компресорах існує так званий «мертвий» об'єм (шкідливий), який виникає з об'єму між поршнем та кришкою циліндра (корпусом) і його стінкою. «Мертвий» об'єм зменшує кількість повітря, яку може захопити компресор, тому значно впливає на його продуктивність. Зазвичай об'єм шкідливого простору складає 4 – 10% об'єму циліндра. Поршневі компресори мають значний робочий діапазон, легко регулюються і характеризуються відносно низьким енергоспоживанням. Недоліком такого типу компресорів є зношування циліндрів, поршнів та поршневих кілець. Спрацювання та задирки на клапанах також знижують ККД компресорів [5].

Ротаційні гвинтові компресори мають наступні особливості[5]:

- забезпечують чистіше повітря;
- компактні агрегати мають вбудовані системи регенерації тепла;
- дуже ефективні при плавному регулюванні;
- потужність холостого ходу вища, ніж у поршневих компресорів;
- слід використовувати як машину, що несе базове навантаження, а додаткові поршневі компресори використовувати для покриття пікових.

У ротаційно-пластинчатих компресорах зміна об'єму відбувається за рахунок обертання в корпусі ексцентрично розташованого ротора, у радіальні пази якого встановлені пластини. Повітря у компресор поступає через вхідний патрубок. Під час обертання ротора за годинниковою стрілкою повітря переміщується в напрямі вихідного патрубку, де об'єм простору між корпусом та ротором менший, ніж на вході. Коли ротор повертається, він стискає повітря між лопатками. Такі машини використовуються для менш напружених режимів роботи, потребують мастила, яке забезпечує необхідне ущільнення і змащення

пластин, що труться. Основною перевагою ротаційних пластинчатих машин є те, що вони не потребують великих капіталовкладень, але не містять систем регенерації тепла [5].

Відцентрові компресори характеризуються наступними особливостями [5]:

- великої потужності виконуються для покриття базового навантаження;
- великі машини мають високу ефективність при повному навантаженні;
- робота з неповним навантаженням досягається за рахунок плавного регулювання дроселя вхідного отвору;
- плавне регулювання повинно використовуватись лише в умовах близьких до повного навантаження, а двопозиційне регулювання більш ефективне для низьких навантажень.

Відцентрові компресори – це динамічні машини, які надають кінетичну енергію повітрю за допомогою високошвидкісних імпелерів (робочих коліс), а потім перетворюють її в потенційну енергію, що створює тиск в секціях дифузора на кожному ступені [5].

На рисунку 1.1 представлена порівняльна характеристика різних типів компресорів .

Будь-яка система стисненого повітря являє собою складну технічну систему, що вимагає проектування кваліфікованими фахівцями та застосування певних методів оптимізації.

1.2 Схеми постачання стисненого повітря

Проблема енергозбереження в останні роки є одним з найважливіших завдань, що стоять перед сучасним підприємством. В умовах ринкової економіки кожна зайва кіловат-година електроенергії лягає на собівартість продукції і в кінцевому рахунку призводить до зниження її конкурентоспроможності. На даний момент ефективність систем виробництва і розподілу стисненого повітря на більшості підприємств досить низька. Це пов'язано зі спрацюванням мереж

розподілу повітря, невідповідністю існуючих мереж до завдань, що на них покладені, експлуатацією компресорів в неоптимальних режимах.

Компресор	Переваги	Недоліки
Поршневі	<ul style="list-style-type: none"> • Низьке споживання енергії, зокрема для великих машин з редуктором • Придатні для високого тиску • Легко регульовані • Порівняно дорогі 	<ul style="list-style-type: none"> • Значні пульсації • Висока кінцева температура • Високі експлуатаційні затрати старішого обладнання • Шуми
Лопатеві	<ul style="list-style-type: none"> • Проста конструкція • Безшумна робота • Компактність 	<ul style="list-style-type: none"> • Обмежений рівень потужності • Повинен бути вбудованим • Залишки мастил
Гвинтові	<ul style="list-style-type: none"> • Безшумні і прості операції • Низькі кінцеві температури з інжекцією оливи або води • Незначний ступінь зношування • Прості у використанні для регенерації тепла • Компактність 	<ul style="list-style-type: none"> • Вище енергоспоживання, ніж поршневих • Повинен бути вбудованим • Залишки мастил – повітрі
Відцентрові	<ul style="list-style-type: none"> • Низьке споживання енергії при високій продуктивності • Безшумна робота • Контроль продуктивності 	<ul style="list-style-type: none"> • Чутливий до забруднення повітря

Рисунок 1.1 – Порівняння різних видів компресорів [5]

Значення правильного вибору схеми постачання стисненим повітрям часто недооцінюється, а дарма, оскільки часто саме тут криється причина підвищених витрат електроенергії і частих поломок компресорного устаткування. Помилки тут можуть вилитися в необхідність додаткових капіталовкладень в майбутньому.

Згідно з [6] існує два основних типи схем подачі повітря: централізована і децентралізована схеми.

У централізованій схемі постачання стисненого повітря до цехів здійснюється із загального компресорного цеху. Як правило, при такій системі

експлуатуються декілька компресорних установок, в основному поршневі або відцентрові, іноді потужні гвинтові. Переваги даної схеми проявляються в повній мірі на великому підприємстві при наявності герметичної пневмомережі, коли всі споживачі зосереджені на відносно невеликій площі (відсутні віддалені точки споживання), робочі тиски більшості споживачів приблизно однакові (робочий тиск мережі).

Переваги схеми [6]:

1. Можливі виходи з ладу окремих компресорів та проведення на них регламентних робіт і планові ремонти не впливають на надійність подачі повітря підприємства в цілому при наявності декількох резервних компресорів (як правило, однотипних).
2. Планові ремонти можуть проводитися в зручний час незалежно від величини завантаження компресорної станції (при наявності резерву).
3. Оскільки все компресорне обладнання знаходиться в одному місці, кількість обслуговуючого персоналу невелика.

Недоліки схеми [6]:

1. Велика протяжність трубопроводів призводить до втрат тиску.
2. Стан існуючих на підприємствах централізованих пневмомагістралей, як правило, не задовільний. Наявні великі витоки, газодинамічний опір підвищено за рахунок наявності місцевих опорів.
3. Висока інерційність системи – оскільки запуск і зупинка великих компресорів вимагає часу, система не може швидко реагувати на зміни необхідної кількості стисненого повітря.
4. У зимовий час можливе обмерзання внутрішніх поверхонь ділянок магістралей, що проходять на відкритому повітрі.
5. При роботі у вихідні дні або нічні зміни, як правило, працюють лише окремі цехи підприємства, для живлення яких використовуються компресори високої продуктивності. Їх експлуатація економічно недоцільна, так як потреба в стисненому повітрі часто реально значно нижче продуктивності компресорів.

6. Через планові ремонти компресорів виникає необхідність наявності резерву.
7. Деякі споживачі можуть потребувати більш високого тиску повітря, а отже виникає необхідність підтримки більш високого тиску в мережі, що призводить до додаткових втрат потужності.
8. Система досить дорога у виготовленні.

У децентралізованій системі живлення споживачів стисненим повітрям здійснюється окремими невеликими компресорами, що встановлюються безпосередньо біля споживача. Необхідно відзначити, що в децентралізованих схемах при локальній потребі в повітрі більше 1 м³/хв доцільне використання надійних гвинтових компресорів, переваги яких широко відомі. Це дозволяє вирішити ряд проблем, властивих поршневим компресорів, таких як необхідність фундаменту під компресор, підвищені шум і вібрація, необхідність періодичних ремонтів (заміна клапанів). Крім того, недорогі поршневі компресори малої продуктивності, як правило, погано пристосовані для використання в промислових цілях і мають невисокий ресурс [7].

Переваги схеми [7]:

1. Зменшується протяжність трубопроводів, що знижує газодинамічні втрати.
2. Вартість системи значно нижче, ніж в разі централізованої.
3. Завдання повітропостачання віддалених виробничих ділянок вирішується значно простіше, ніж при централізованій схемі – не потрібно тягнути ділянки магістралі на значні відстані.
4. Для кожного споживача може бути встановлений компресор з необхідним тиском (вкрай важливо для мереж з різними робочими тисками споживачів).
5. Для кожного споживача може бути підібраний компресор з необхідною продуктивністю, що знижує енерговитрати.
6. Обмерзання виключається, оскільки трубопроводи не виходять за межі цеху, де встановлено компресор.
7. Знижуються витрати на утримання стисненого повітря, тому що відпадає необхідність в теплоізоляції, герметизації, ремонту та обслуговування трубопроводів.

8. Невеликі компресори не вимагають фундаментів, що спрощує і здешевлює їх установку і пусконаладження.

Недоліки такої системи [7]:

1. Резервування сильно ускладнено, оскільки потребує дублювання компресорного устаткування на відповідальних ділянках. Вартість компресорного устаткування може виявитися трохи вище, ніж при централізованій системі.
2. При установці компресора безпосередньо у виробничому приміщенні виникає шум, який є небезпечним фактором для персоналу.
3. Система погано пристосована до можливого різкого зростання потреби в стисненому повітрі на конкретній ділянці (наприклад, при встановленні додаткових споживачів) - окрім того, що буде потрібна заміна компресора на більш потужний або установка додаткового, переріз локальної магістралі може виявитися недостатнім.

Вибір оптимальної схеми подачі повітря залежить від конкретних умов на конкретному підприємстві, йому обов'язково повинен передувати повний аналіз ситуації, існуючих пневматичних ліній, енергоаудит всього ланцюга виробництва і подачі стисненого повітря, з урахуванням необхідних капіталовкладень і постійних витрат. Децентралізована схема аж ніяк не є універсальним рішенням, застосування її має бути економічно обґрунтовано. При проектуванні пневматичних систем необхідно враховувати не тільки споживачів, наявних в даний час, але і можливі варіанти зміни як необхідної кількості стисненого повітря, так і розташування точок споживання [6].

1.3 Основні методи підвищення енергетичної ефективності систем стисненого повітря

Енергоефективність виробництва, підготовки і транспортування стисненого повітря визначається якістю проектування, реалізації, експлуатації та технічного обслуговування відповідної системи. Конструкція системи повинна забезпечувати ефективне задоволення потреб виробництва в стисненому повітрі. До реалізації

заходів по оптимізації енергоефективності системи стисненого повітря необхідно проаналізувати технологічні процеси, які споживають стиснене повітря, і потреби цих процесів. Доцільно інтегрувати діяльність щодо забезпечення ефективності системи стисненого повітря в загальну систему менеджменту енергоефективності, підтримавши цю діяльність такими засобами, як достовірний аудит системи і база даних за її характеристиками.

Правильно спроектована і належним чином експлуатована енергоефективна система стисненого повітря може приносити споживачеві тисячі гривень щорічної економії. Крім того, вона може мінімізувати ризик скорочення виробництва, забезпечуючи надійність подачі повітря, і вирішити проблеми охорони праці і здоров'я при роботі з системами, що знаходяться під тиском. Кожна гривня економії на енергетичних витратах приносить постійну подальшу економію витрат, ефективно збільшуючи прибуток.

З усіх енергоносіїв саме модернізація системи стисненого повітря дозволяє досягти негайної економії на будь-якому підприємстві. Крім того, більшість заходів по економії енергії не вимагає значних капіталовкладень [4].

На рисунку 1.2 показано, що за 10 років експлуатації компресора вартість енергії, необхідної для роботи системи, істотно перевищує початкові капіталовкладення. На цьому малюнку видно, що на частку техобслуговування припадає 7% сукупних витрат, але воно необхідне для досягнення максимальної ефективності будь-якого компресора. На типовому промисловому підприємстві на частку стисненого повітря доводиться до 10% сукупних витрат на електроенергію, при цьому на деяких виробництвах ця частка є вищою.

Основною метою розглянутих методів є проектування або модифікація системи стисненого повітря таким чином, який дозволяє підвищити її енергоефективність. Додаткові позитивні ефекти підвищення енергоефективності можуть включати зниження рівня шуму і витрати охолоджуючої води. Термін служби систем стисненого повітря і компресорного устаткування відносно великий, внаслідок чого витрати матеріалів при заміні обладнання незначні.



Рисунок 1.2 – Витрати, пов'язані з роботою компресора за 10 років його експлуатації

Підвищення енергоефективності в поєднанні з коротким терміном окупності є важливою мотивацією для впровадження методів, які наведені нижче.

Далі розглянемо основні існуючі технології та методи підвищення енергоефективності систем стисненого повітря згідно з [10] .

1.3.1 Оптимізація загального устрою системи

В даний час загальна будова багатьох діючих систем стисненого повітря не відповідає існуючим умовам роботи підприємства. Поетапне додавання до системи нових компресорів і споживачів стисненого повітря без паралельного перегляду вихідного пристрою системи в цілому часто призводить до того, що системи працюють в умовах, далеких від оптимальних.

Однією з найважливіших характеристик системи стисненого повітря є тиск, конкретна величина якого визначається рядом вимог, що залежать від застосування стисненого повітря. Як правило, ця величина являє собою компроміс між доводами на користь низького тиску (більш висока енергоефективність) і високого тиску (можливість використання менших і дешевших пристроїв). У більшості випадків споживачі використовують тиск 6 бар

(м), проте вимоги до тиску можуть досягати 13 бар (м). Часто тиск системи вибирається виходячи з максимального тиску, необхідного споживачам [6].

Важливо мати на увазі, що занадто низький тиск може призвести до порушення роботи деяких пристроїв, тоді як занадто високий тиск не викликає негативних ефектів такого роду, але призводить до зниження ефективності (ККД) системи. У багатьох випадках система функціонує при тиску 8 або 10 бар (м), проте при цьому велика частина повітря, що подається споживачам, дроселюється до рівня 6 бар (м).

Прогресивної практикою є вибір тиску в системі, що задовольняє вимоги споживачів 95% всього повітря, і установка невеликих пристроїв, що підвищують тиск, для інших споживачів. Компанія-оператор може спробувати усунути (замінити) пристрої, що вимагають тиску вище 6 бар (м), або встановити дві системи - одну з тиском 6,5 бар (м) і іншу, розраховану на більш високий тиск.

Ще однією важливою характеристикою системи є обсяг резервуарів для зберігання стисненого повітря. Оскільки в більшості випадків споживачами стисненого повітря є безліч пристроїв, лише деякі з яких працюють постійно, потреба в стислому повітрі схильна до значних коливань. Достатній обсяг резервуарів дозволяє згладжувати коливання вимог до продуктивності системи і задовольняти короткострокові піки попиту [10].

Згладжування коливань потреб створює умови для більш рівномірної експлуатації компресорів меншої потужності, що дозволяє скоротити час простоїв і загальне споживання електроенергії. В системі може бути встановлено кілька резервуарів. Продуктивним може бути і розміщення резервуарів поблизу пристроїв, що відрізняються короткостроковим інтенсивним споживанням стислого повітря, що дозволяє задовольняти пікові потреби і експлуатувати систему при меншому тиску.

Третім фундаментальним питанням, яке має бути вирішене при проектуванні системи, є вибір діаметра трубопроводів і місць розташування компресорів. Будь-які труднощі або перешкоди для руху повітря, так само, як і необхідність долати довгі ділянки труб, призведе до падіння тиску. Як правило, в

розподільних системах найбільше падіння тиску має місце у кінцевих пристроях, де часто зустрічаються елементи недостатнього розміру, включаючи рукави, труби, з'єднання, фільтри, регулятори і маслорозпилювачі. Зниженню фрикційних втрат може сприяти, зокрема, використання зварних трубопроводів.

У деяких випадках споживання стисненого повітря на якій-небудь ділянці підприємства поступово зростає в міру розвитку виробництва, в результаті чого діаметр відповідного відгалуження виявляється недостатнім для збільшеного витрати повітря, що призводить до падіння тиску. Іноді деякі пристрої, які споживали стиснене повітря, виводяться з експлуатації. В цьому випадку необхідно відключити максимальну ділянку трубопроводу, що веде до цього устаткування, яку можна перекрити, не завдаючи шкоди чинним споживачам.

В системі, спроектованій належним чином, падіння тиску між компресором і кінцевим споживачем становить менше 10% тиску на виході компресора. Це може бути досягнуто за допомогою: регулярного моніторингу падіння тиску, вибору осушувачів, фільтрів, шлангів та з'єднань, що характеризуються низьким падінням тиску при проектних умовах, скорочення відстані, яку проходить повітрям в розподільчій системі, а також перерахунку необхідного діаметра трубопроводів в разі збільшення споживання стисненого повітря.

Часто в категорії «загальний устрій системи» враховується і те, як організовано використання повітря на рівні кінцевого споживача. У деяких випадках таке використання може бути неефективним - так, повітря може спочатку стискатися до надлишкового тиску, а потім розширюватися, щоб довести його тиск до необхідного. Однак в даний час такі ситуації трапляються нечасто, оскільки в промисловості поширене розуміння того, що стиснене повітря являє собою значний фактор витрат [10].

1.3.2 Використання двигунів зі змінною швидкістю

Компресори обладнуються приводами зі змінною швидкістю, головним чином, в умовах, коли потреби в стисненому повітрі істотно варіюють протягом

дня і від одного дня до іншого. Для управління роботою компресорів можуть використовуватися такі традиційні підходи, як включення / відключення, модуляція, регулювання продуктивності і т.д. Однак якщо використання подібних методів призводить до частих включень і відключень, а також тривалих періодів холостого ходу, результатом може бути зниження енергоефективності. При використанні приводу зі змінною швидкістю частота обертання електроприводу компресора плавно регулюється в залежності від зміни потреби в стислому повітрі, забезпечуючи високий рівень енергоефективності [10].

За даними досліджень, більшість систем стисненого повітря характеризується середніми або значними варіаціями споживання. Тому існує значний потенціал енергозбереження за рахунок оснащення компресорів приводами з регульованою швидкістю.

Згідно з [10] оснащення компресорів приводами зі змінною швидкістю може забезпечити і ряд інших позитивних ефектів, крім енергозбереження:

1. Досягається висока стабільність тиску повітря, що суттєво для деяких технологічних процесів, чутливих до цього параметру.
2. Коефіцієнт потужності значно вище, ніж при використанні традиційних двигунів, що сприяє зниженню реактивної потужності.
3. Пусковий струм двигуна ніколи не перевищує струм його повного навантаження. Як наслідок, в електричних колах можна використовувати елементи, розраховані на менший номінальний струм. Крім того, користувачі можуть уникнути штрафів за пікові рівні потоку під час запуску двигунів, якщо такі штрафи вносяться енергетичною компанією. Нарешті, відсутність різких піків струму при запуску двигуна автоматично веде до зниження споживання енергії.
4. Плавний пуск на низьких швидкостях, що забезпечується двигуном зі змінною швидкістю, дозволяє уникнути піків струму і обертового моменту, що веде до зниження механічного зносу обладнання та електричного навантаження, що сприяє продовженню терміну служби компресора.

5. Знижуються рівні шуму, тому що компресор працює тільки тоді, коли це необхідно, з необхідною продуктивністю.

Компресори, оснащені двигуном зі змінною швидкістю, можуть застосовуватися в різних галузях промисловості, включаючи, наприклад, металургію, а також харчову, текстильну та хімічну промисловість, у тих випадках, коли мають місце значні коливання рівня споживання стисненого повітря. У ситуації, коли компресори безперервно працюють при повній або близькій до повного навантаження, використання двигуна зі змінною швидкістю не призводить до суттєвого енергозбереження і не є виправданим [10].

Компресори з приводом змінної швидкості можуть бути встановлені в існуючій системі стисненого повітря. Більше того, регулятор частоти може бути встановлений вже наявний привід компресора, розрахований на експлуатацію з постійною швидкістю. Однак при спільному встановленні двигуна та регулятора досягнуто більшого ефекту, тому що ці пристрої спеціально підібрані для максимально ефективної роботи в певному діапазоні швидкостей. Доцільно обмежити застосування технологій приводів зі змінною швидкістю більш сучасними компресорами, оскільки при його використанні з старими компресорами можливі проблеми.

Багато систем стисненого повітря вже обладнані приводами зі змінною швидкістю, тому потенціал для впровадження даної технології в промисловість становить близько 25% існуючих систем. Обсяг енергозбереження може досягати 30%, хоча середній ефект, досягнутий при додаванні до системи одного компресора з двигуном змінної швидкості, становить близько 15%. Досить імовірно, що установка компресора з приводом змінної швидкості виявилася б корисним заходом для багатьох систем стисненого повітря, які на даний момент не мають таких компресорів.

1.3.3 Високоєфективні електродвигуни

Хоча офіційного визначення високоєфективного електродвигуна не існує, під цим терміном зазвичай розуміються двигуни, в яких втрати зведені до

мінімально можливого рівня. Пріоритетом при проектуванні високоефективних двигунів є мінімізація як електричних, так і механічних втрат з метою зниження енергоспоживання пристрою. У світі існує ряд класифікацій електродвигунів з точки зору енергоефективності. В рамках цих класифікацій високоефективні двигуни відносяться до вищих категорій, наприклад, EFF1, NEMA premium і т.п.

Оскільки знижений рівень втрат не накладає обмежень на можливі застосування двигуна, високоефективні двигуни можуть застосовуватися практично всюди [10].

1.3.4 Централізована система управління системою стисненого повітря

На більшості підприємств до складу системи стисненого повітря входить кілька компресорів. Загальна енергоефективність такої системи може бути істотно підвищена за рахунок впровадження центрального керуючого пристрою (системи управління), здатного отримувати виробничу інформацію від компресорів і повністю або частково управляти режимами їх роботи.

Ефективність такого керуючого пристрою істотно залежить від можливостей комунікаційних каналів між ним і виробничим обладнанням. Конкретна реалізація цих каналів може варіювати від простих реле з плаваючим контактом до мереж, що використовують протоколи систем автоматизації виробництва. Удосконалення каналів зв'язку відкриває додаткові можливості для отримання виробничої інформації від компресорів, управління роботою окремих компресорів, а також оптимізації загального енергоспоживання системи стисненого повітря [10].

Стратегія управління, що реалізується за допомогою керуючого пристрою, повинна враховувати характеристики окремих компресорів і, зокрема, що допускаються ними режими управління. Нижче наводиться обговорення типових режимів управління компресорами і їх впливу на загальні підходи до управління системою.

Найбільш поширеними режимами управління окремими компресорами є:

- перемикання між режимами навантаження (робочого ходу), холостого ходу і зупинки;
- плавне регулювання частоти обертання.

Розвинена сучасна система управління системою стисненого повітря в поєднанні з керуючими пристроями окремих компресорів може мати наступні характеристики [10].:

- розвинені комунікаційні можливості (наприклад, на основі мережових протоколів автоматизації);
- повний доступ центрального керуючого пристрою до інформації про функціонування окремих компресорів;
- можливість всебічного управління режимом роботи всіх компресорів з боку центрального керуючого пристрою;
- можливість оптимізації загальної стратегії управління на основі самонавчання, включаючи розпізнавання характерних особливостей конкретної системи стисненого повітря;
- визначення станів системи (поєднань навантаження, холостого ходу і зупинки окремих компресорів), що характеризуються високою енергоефективністю, використання цих станів і перехід між ними з метою задоволення загальної потреби в стислому повітрі;
- ефективне управління компресорами з приводами з регульованою швидкістю, що дозволяє компенсувати короткострокові коливання потреби в стислому повітрі і уникати тривалої роботи компресорів в неефективних режимах, зокрема, з постійною низькою швидкістю;
- мінімізація частоти зупинки / запуску і тривалості періодів холостого ходу компресорів з постійною швидкістю;
- використання складних моделей і методів прогнозування загального споживання стисненого повітря, включаючи, зокрема, виявлення регулярності і періодичних циклів споживання (наприклад, добових і тижневих циклів, розподілу потреб по конкретним споживачам і т.д.);

- додаткові функції, наприклад, віддалений моніторинг, збір інформації про виробництво, планування технічного обслуговування, можливість дистанційного технічного обслуговування і / або передача попередньо обробленої виробничої інформації через веб-сервери;
- моніторинг стану і управління іншими компонентами системи стисненого повітря, крім компресорів.

1.3.5 Утилізація теплоти

Велика частина електроенергії, споживаної промисловим компресором, в кінцевому рахунку, перетворюється на теплову енергію та повинна бути відведена в навколишнє середовище. У багатьох випадках за допомогою адекватних заходів можна забезпечити утилізацію значної частини цього тепла і його корисне застосування, наприклад, для нагріву повітря або води при наявності відповідної потреби.

Згідно з [10] можливі дві різні системи утилізації тепла:

1. Підігрів повітря: компресорні агрегати з повітряним охолодженням придатні для утилізації тепла в цілях опалення приміщень, промислової сушки, попереднього підігріву повітря для пальників і будь-яких інших застосувань, в яких існує потреба в підігрітому повітрі. У таких агрегатах атмосферне повітря проходить через систему охолодження компресора, відбираючи тепло, що утворюється при стисканні повітря. Оскільки компресорні агрегати, як правило, встановлені в кожусі і вже оснащені теплообмінниками та вентиляторами, що забезпечують роботу системи охолодження, єдиною необхідною модифікацією є додавання повітровода і додаткового вентилятора для забезпечення потоку повітря і виключення будь-якого протитиску на вентилятори системи охолодження. Робота таких систем утилізації тепла може регулюватися за допомогою простого вентиля з термостатичним управлінням. При використанні компресорів з водяним охолодженням утилізація тепла для опалення приміщень є менш

ефективною внаслідок необхідності додаткової щаблі теплообміну і того факту, що температура доступного тепла, як правило, виявляється нижче. Однак, оскільки багато компресори з водяним охолодженням характеризуються значною потужністю, утилізація тепла з метою опалення може виявитися привабливим варіантом.

2. Підігрів води: можливим варіантом є також установка теплообмінника для утилізації тепла, що відводиться при охолодженні компресорного масла в компресорах з повітряним і водяним охолодженням, за допомогою виробництва гарячої води. Залежно від конструкції теплообмінника може проводитися гаряча вода для господарських або інших потреб. Коли потреба в гарячій воді відсутня, гаряче масло направляється в звичайну систему охолодження. Гаряча вода може використовуватися в системах центрального опалення, душових та пральнях, в промислових процесах очищення, теплових насосах, для промивання виробів після нанесення гальванічних (електрохімічних) покриттів і для будь-яких інших застосувань, що вимагають нагрітої води.

1.3.6 Зменшення витоків в системах стисненого повітря

Зі скороченням витоків в системах стисненого повітря пов'язаний потенціал енергозбереження, який значно перевершує всі інші резерви. Обсяг витоків прямо пропорційний робочому тиску системи. Витоки мають місце в будь-якій системі стисненого повітря .

У великих системах, які належним чином обслуговуються, непродуктивні витрати потужності компресора, пов'язані з витоками, не повинні перевищувати 10%. Відповідне значення для невеликих систем не повинно перевищувати 5%.

Тому програми профілактичного технічного обслуговування для систем стисненого повітря повинні включати заходи щодо запобігання витоків стисненого повітря і періодичну оцінку обсягу витоків. Після виявлення і усунення витоків необхідно провести повторну оцінку. Для оцінки обсягу витоків можуть використовуватися такі методи:

- оцінка обсягу витоків: всі методи визначення обсягу витоків припускають відключення від системи всіх споживачів для того, щоб під час вимірювань витрата повітря в системі була обумовлена виключно витоками.
- в тому випадку, коли система обладнана лічильником витрати повітря, обсяг витоків може бути виміряний безпосередньо;
- в системі стисненого повітря, де компресор управляється за допомогою запуску / зупинки (тобто, працює в повторно-короткочасному режимі), можливо оцінити обсяг витоків на підставі відносини часу роботи компресора до загальної тривалості періоду вимірювання. Для забезпечення репрезентативності результату період вимірювання повинен включати, як мінімум, п'ять запусків компресора.
- обсяг витоків в системі, робота якої регулюється на основі будь-якого іншого принципу, може бути оцінений за наявності запірного клапана між компресором і системою. Для оцінки витоків цим способом необхідно хоча б приблизне уявлення про обсяг системи після компресора, а також наявність манометра після клапана;

Іноді для усунення витоків досить затягнути з'єднання, але може знадобитися і заміна несправного обладнання, наприклад, муфт, фітінгів, ділянок трубопроводу, рукавів, компенсаторів, дренажних трубопроводів і конденсатівідвідників. У багатьох випадках виток викликаний неякісним ущільненням різьбових з'єднань. Устаткування або цілі частини системи, які не використовуються в даний час, повинні бути ізольовані від діючої системи стисненого повітря.

Ще одним можливим способом скорочення витоків є зниження робочого тиску системи. Оскільки обсяг втрат залежить від перепаду тиску в місцях витоків, це призводить до скорочення витрат стисненого повітря.

Існує ряд методів виявлення конкретних місць витоків:

- на слух (в разі великих витоків);

- за допомогою мильного розчину, що наноситься за допомогою пензля на місце передбачуваної витoku;
- за допомогою ультразвукового детектора;
- за допомогою спеціальних газів, наприклад, водню або гелію, і відповідних детекторів.

Хоча витoku можуть мати в будь-яких місцях системи, найбільш часто вони пов'язані з наступними елементами [10].:

- муфти, рукава і фітинги;
- регулятори тиску;
- діючі конденсатовідвідники і ізолюючі клапани;
- з'єднання і ущільнення різьбових з'єднань;
- пристрої з пневмоприводом, що споживають стиснене повітря.

Приводячи до втрат енергії, витoki одночасно можуть бути джерелом і інших виробничих втрат. Витoki викликають зниження тиску стисненого повітря в системі, що може знизити продуктивність пристроїв з пневмоприводом і, як наслідок, всього технологічного процесу. Крім того, приводячи до частіших циклів запуску / зупинки, витoki викликають прискорений знос практично всього обладнання системи (включаючи сам компресорний агрегат). Збільшення часу роботи устаткування може також призводити до підвищених вимог до технічного обслуговування останнього, а також до збільшення загальної тривалості нештатних зупинок. Нарешті, результатом витоків повітря може бути необґрунтоване збільшення потужності компресора [10].

1.3.7 Оптимізація тиску системи

Чим нижче робочий тиск системи, тим більш ефективним з економічної точки зору є виробництво стисненого повітря. Однак система повинна забезпечувати всіх споживачів повітрям достатнього тиску в будь-який час, коли це необхідно. Зниження пікового тиску може бути досягнуте за допомогою вдосконалення системи управління. В принципі, існує кілька способів «звужити»

діапазон тисків системи і, як наслідок, зменшити тиск виробленого стиснутого повітря [10]:

1. Безпосереднє регулювання за допомогою механічних перемикачів самого компресора є простим способом установки робочого діапазону тисків. Оскільки з часом величина тиску, встановлена таким чином, може мимоволі збиватися, регулювання системи повинна періодично повторюватися.
2. Інтелектуальна система управління, заснована на використанні приводу змінної швидкості (з перетворювачем частоти) або запуску компресора оптимальної потужності (в системах з кількох компресорів). При цьому тиск регулюється за допомогою використання компресора з приводом з регульованою швидкістю в якості компресора пікового навантаження, потужність якого визначається, виходячи з поточних потреб системи, або за допомогою централізованої системи управління, що забезпечує запуск компресора (або групи компресорів) оптимальної потужності.
3. Скорочення діапазону тисків до допустимої межі (оптимізована інтелектуальна система управління). Така система дозволяє знизити верхній рівень діапазону тисків до величини, що лише незначно перевищує мінімально допустимий рівень тиску.

Як правило, управління компресорами за допомогою приводів зі змінною швидкістю (в інтелектуальних або оптимізованих інтелектуальних системах управління) є економічно ефективним лише в разі встановлення нового обладнання, оскільки виробники не рекомендують оснащувати перетворювачами частоти вже встановлене обладнання.

Висновки до розділу

1. Представлено загальну характеристику систем постачання стисненого повітря та види компресорів, визначено, що система включає в себе наступні основні компоненти: виробництво стисненого повітря; зберігання стисненого повітря; підготовка стисненого повітря; розподіл стисненого повітря.

2. Проведено порівняльний аналіз централізованої та децентралізованої схем постачання стисненого повітря, в результаті якого визначено, що універсального рішення для вибору схеми постачання стисненого повітря не існує і вибір тої чи іншої схеми повинен проводитись на основі детального аналізу режиму споживання повітря, аналізу надійності системи та техніко-економічних розрахунків.
3. Проаналізовано та досліджено основні існуючі заходи з підвищення рівня енергоефективності в системах постачання стисненого повітря. В результаті аналізу виявлено, що найбільший потенціал енергозбереження пов'язаний зі скороченням витоків стисненого повітря, оскільки саме витoki призводять до ряду інших виробничих втрат, такі як втрати тиску в системі, передчасний знос обладнання, необґрунтоване збільшення потужності компресора.

2 АНАЛІЗ ТА РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ АМІАЧНОГО ЦЕХУ НА ХІМІЧНОМУ ПІДПРИЄМСТВІ .

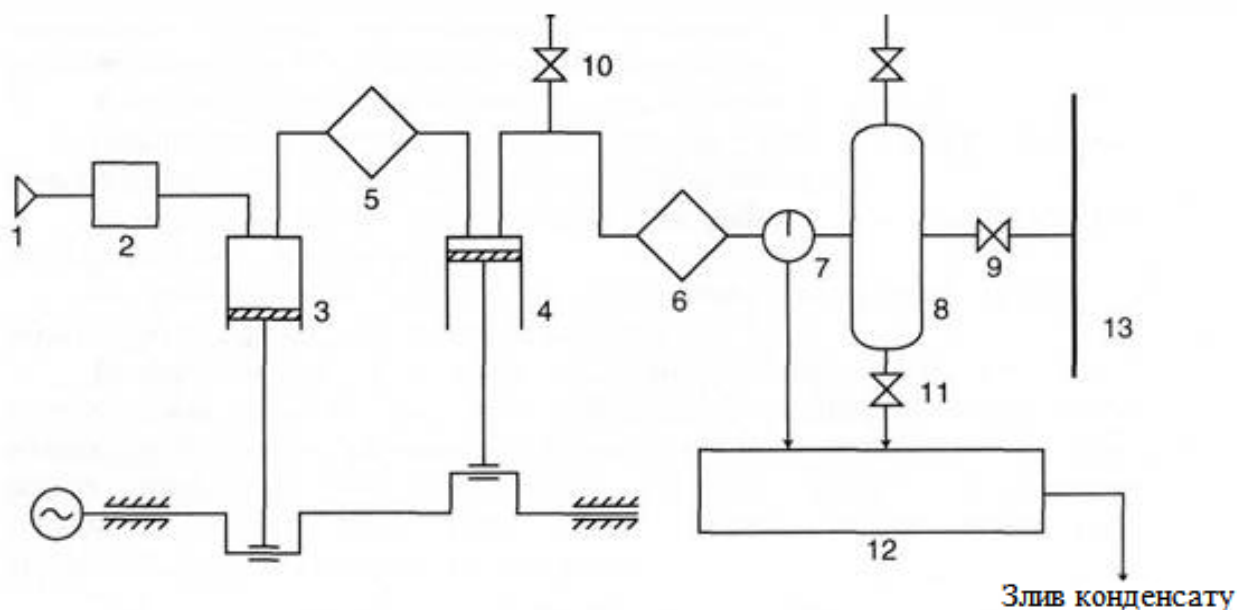
2.1. Дослідження технологічного процесу виробництва стисненого повітря.

Для технологічних потреб аміачного цеху необхідне стиснене повітря, яке використовується для КВПіА. Для цього поряд з цехом розташована компресорна підстанція, яка водночас постачає стиснене повітря і для іншого цеху, де передбачена установка компримування і осушення повітря для КВПіА.

Розглянемо схему поршневої компресорної підстанції (рис.2.1). Поршневий компресор, що приводиться в рух електродвигуном, через повітрязабірник (1) всмоктує атмосферне повітря. Далі повітря проходить по трубопроводу і потрапляє у фільтр (2), де очищується від пилу та вологи. Після фільтра повітря надходить по трубопроводу до I -ї ступені компресора (3), де стискається до тиску 170-200 кПа (1,7-2,0 кгс/см²). Після стискання через зворотній клапан та проміжний трубопровід повітря нагнітається в міжтрубний простір міжступінчатого холодильника (5), де воно охолоджується до температури не більш 40 °С. Далі повітря надходить на всмоктування II -ї ступені компресора (4) , де стискається до тиску не більше 0,7 МПа(7 кгс/см²). Після стискання повітря через трубопровід надходить у міжтрубний простір кінцевого холодильника, де воно охолоджується до температури не більш 40 °С. Далі повітря надходить у сепаратор (7), а після - в повітряний ресивер (8), де здійснюється зниження пульсацій тиску стисненого повітря і відділення вологи. З ресивера стиснене повітря надходить в загальний колектор (13) стисненого повітря і розподіляється для живлення приладів та засобів автоматики цеху.

Повітряно-масляний конденсат, що знаходиться в баку (12), представляє серйозну загрозу для навколишнього середовища. Тому в більшості європейських країн злив конденсату в загальну каналізацію заборонений. Утилізація конденсату повинна бути екологічно безпечною, що передбачає його поділ на дві складові -

воду і масло. Після цього вода видаляється в каналізацію, а масло утилізується у відповідності до діючих норм і правил.



1- повітрязабірник; 2 - фільтр; 3 - перша ступінь компресора; 4 - друга ступінь компресора; 5- міжступенчатий холодильник; 6 - кінцевий холодильник; 7 - волого-масловіддільник; 8 - ресивер; 9-магістральний вентиль; 10- пусковий вентиль; 11-- випускний вентиль; 12 - про- дувний бак; 13-колектор.

Рисунок 2.1 – Схема поршневої компресорної підстанції

Колектор стиснутого повітря з'єднаний з мережею повітря КВПіА об'єднання, куди надходить повітря КВПіА з цеху К-3 .

В схемі є ємність (100 м^3), яка забезпечує годинний запас стиснутого повітря для КВПіА.

Зниження тиску в загальному колекторі стиснутого повітря для КВПіА сигналізується сигналізатором. При зниженні тиску менше 500 кПа (5 кгс/см^2) передбачена блоківка, яка включає компресор.

У якості привода компресора стоїть асинхронний двигун серії 4АМ, потужністю 600 кВт .

Оскільки потреби у стисненому повітрі з часів проектування компресорної станції значно знизилися, за рахунок зменшення об'ємів виробництва, то необхідно виконати новий розрахунок потреб у стисненому повітрі.

2.2 Розрахунок параметрів системи стисненого повітря.

2.2.1 Визначення витрат на КВПіА

Проведемо розрахунок для аміачного цеху відповідно до [11].

Коефіцієнт попиту визначається як добуток окремих коефіцієнтів за формулою (2.1):

$$k_{\text{КВПіА1}}^{\text{ц1}} = k_{\text{вик}} \cdot \chi_{\text{одн}} \cdot \chi_{\text{вт.інс}} \cdot \chi_{\text{вт.мер}}, \quad (2.1)$$

де $k_{\text{вик}}$ – коефіцієнт використання; $k_{\text{одн}}$ – коефіцієнту одночасності; $k_{\text{вт.інс}}$ – коефіцієнт втрат в приладах; $k_{\text{вт.мер.}}$ – коефіцієнту втрат в мережі.

Підставивши відповідні значення у формулу (2.1), отримаємо:

$$k_{\text{КВПіА1}}^{\text{ц1}} = 0,67 \cdot 0,81 \cdot 1,18 \cdot 1,2 = 0,77,$$

$$k_{\text{КВПіА2}}^{\text{ц1}} = 0,6 \cdot 0,55 \cdot 1,18 \cdot 1,2 = 0,47.$$

Таким чином, для аміачного цеху, де розміщено два типа приладів КВПіА, визначаємо витрати повітря за нормальних умов за формулою (2.2), м³/хв:

$$Q_{\text{ц1}}^{\text{н.у.}} = m_{\text{КВПіА1}} \cdot q_{\text{КВПіА1}} \cdot k_{\text{КВПіА1}}^{\text{ц1}} + m_{\text{КВПіА2}} \cdot q_{\text{КВПіА2}} \cdot k_{\text{КВПіА2}}^{\text{ц1}}, \quad (2.2)$$

де $q_{\text{КВПіА1}}$, $q_{\text{КВПіА2}}$ – питомі витрати повітря для кожного типу приладів, м³/хв ;

$m_{\text{КВПіА1}}$, $m_{\text{КВПіА2}}$ – кількість однотипних споживачів, шт.

Отже, витрати повітря за нормальних умов будуть дорівнювати:

$$Q_{\text{ц1}}^{\text{н.у.}} = 12 \cdot 1,77 + 15 \cdot 1,2 \cdot 0,47 = 17,7 \text{ м}^3/\text{хв}.$$

Розрахунок споживання стисненого повітря аміачного цеху за реальних умов за формулою (2.3), м³/хв:

$$Q_{цл}^{p.y.} = Q_{цл}^{н.у.} \frac{P_{н.у.} \Psi_{p.y.}}{T_{н.у.} \Phi_{p.y.}}, \quad (2.3)$$

де $P_{н.у.}$ – тиск за нормальних умов, Па ; $P_{p.y.}$ – тиск за реальних умов, Па; $T_{н.у.}$ – температура за нормальних умов, К; $T_{p.y.}$ – температура за реальних умов, К.

$$Q_{цл}^{p.y.} = 17,7 \cdot \frac{0,1 \cdot 13}{0,35 \cdot 273} = 5,8 \text{ м}^3/\text{хв.}$$

Витрати повітря при максимальному навантаженні визначаються за формулою (2.4), м³/хв:

$$(Q_{цл}^{p.y.})_{\max} = Q_{цл}^{p.y.} \Psi_{\text{пер}} \Psi_{\text{вт.мер}}, \quad (2.4)$$

$$(Q_{цл}^{p.y.})_{\max} = 5,8 \cdot 2 \cdot 0,9 = 10,44 \text{ м}^3/\text{хв.}$$

Витрати повітря при максимально тривалому навантаженні визначаються за формулою (2.5) , м³/хв:

$$(Q_{цл}^{p.y.})_{\text{мтн}} = (Q_{цл}^{p.y.})_{\max} \Psi, \quad (2.5)$$

$$(Q_{цл}^{p.y.})_{\text{мтн}} = 10,44 \cdot 0,9 = 9,396 \text{ м}^3/\text{хв.}$$

Витрати повітря при максимально тривалому навантаженні за умов всмоктування визначаються за формулою (2.6):

$$(Q_{цл}^{н.с.})_{\text{мтн}} = (Q_{цл}^{p.y.})_{\text{мтн}} \frac{P_{p.y.} \Psi_{н.с.}}{T_{p.y.} \Phi_{н.с.}}, \quad (2.6)$$

де $P_{н.с.}$, $T_{н.с.}$ – тиск [Па] та температура [К] навколишнього середовища.

$$(Q_{ц1}^{н.с.})_{\text{мтн}} = 9,396 \cdot \frac{0,35 \cdot 291}{0,1 \cdot 13} = 30,57 \text{ м}^3/\text{хв.}$$

Проведемо розрахунок для другого цеху.

Визначаємо коефіцієнт попиту за формулою (2.1):

$$k_{\text{КВПіА}}^{ц2} = 0,6 \cdot 0,62 \cdot 1,18 \cdot 1,2 = 0,53 .$$

$$k_{\text{КВПіА2}}^{ц2} = 0,67 \cdot 0,64 \cdot 1,18 \cdot 1,2 = 0,61 .$$

Таким чином, для другого цеху, де розміщено два типа приладів КВПіА , визначаємо витрати повітря за нормальних умов за формулою (2.2):

$$Q_{ц2}^{н.у.} = 19 \cdot 0,53 + 12 \cdot 0,61 = 18,854 \text{ м}^3/\text{хв.}$$

Споживання стисненого повітря другого цеху за реальних умов визначається за формулою (2.3):

$$Q_{ц2}^{р.у.} = 18,854 \cdot \frac{0,1 \cdot 13}{0,35 \cdot 273} = 6,2 \text{ м}^3/\text{хв.}$$

Витрати повітря при максимальному навантаженні визначаються за формулою (2.4) :

$$(Q_{ц2}^{р.у.})_{\text{max}} = 6,2 \cdot 1,2 \cdot 1,5 = 11,16 \text{ м}^3/\text{хв.}$$

Витрати повітря при максимально тривалому навантаженні визначаються за формулою (2.5):

$$(Q_{ц2}^{р.у.})_{\text{мтн}} = 11,16 \cdot 0,9 = 10,044 \text{ м}^3/\text{хв.}$$

Витрати повітря при максимально тривалому навантаженні за умов всмоктування визначається за формулою (2.6) :

$$(Q_{ц2}^{н.с.})_{\text{мтн}} = 10,044 \cdot \frac{0,35 \cdot 291}{0,1 \cdot 13} = 32,7 \text{ м}^3/\text{хв.}$$

Визначаємо сумарні витрати повітря на два цехи.

При максимальному навантаженні сумарні витрати дорівнюють:

$$(Q_{ц.с.}^{п.у.})_{\text{max}} = \sum_{i=1}^n (Q_{ц}^{п.у.})_{\text{max},i} = 10,44 + 11,16 = 21,6 \text{ м}^3/\text{хв.}$$

При максимально тривалому навантаженні за реальних умов:

$$(Q_{ц.с.}^{п.у.})_{\text{мтн}} = \sum_{i=1}^n (Q_{ц}^{п.у.})_{\text{мтн},i} = 9,396 + 10,044 = 19,44 \text{ м}^3/\text{хв.}$$

Сумарні витрати повітря за нормальних умов :

$$(Q_{с.}^{н.у.}) = \sum_{i=1}^n (Q_{ц}^{н.у.})_i = 17,7 + 18,854 = 36,55 \text{ м}^3/\text{хв.}$$

Сумарні витрати повітря за умов всмоктування:

$$(Q_{с.}^{н.с.})_{\text{мтн}} = \sum_{i=1}^n (Q_{ц}^{н.с.})_{\text{мтн},i} = 30,57 + 32,7 = 63,27 \text{ м}^3/\text{хв.}$$

2.2.2 Конструктивний розрахунок повітропроводів

Для визначення діаметру повітропроводу при заданій швидкості повітря ($w = 15 \text{ м/с}$) згідно з [11] користуємося формулою (2.7):

$$d_{\text{тр}} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{\text{п.у.}}^{\text{п.у.}}}{\rho \cdot w \cdot 60}}, \quad (2.7)$$

$$d_{\text{тр}}^1 = \sqrt{\frac{4 \Psi Q_1^{\text{p.y.}})_{\text{max}}}{p \Psi w \Psi 0}} = \sqrt{\frac{4 \Psi 69,128}{3,14 \Psi 5 \Psi 0}} = 0,49 \text{ м.}$$

$$d_{\text{тр}}^2 = \sqrt{\frac{4 \Psi Q_{\text{ц1}}^{\text{p.y.}})_{\text{max}}}{p \Psi w \Psi 0}} = \sqrt{\frac{4 \Psi 0,44}{3,14 \Psi 5 \Psi 0}} = 0,12 \text{ м.}$$

$$d_{\text{тр}}^3 = \sqrt{\frac{4 \Psi Q_{\text{ц2}}^{\text{p.y.}})_{\text{max}}}{p \Psi w \Psi 0}} = \sqrt{\frac{4 \Psi 1,16}{3,14 \Psi 5 \Psi 0}} = 0,125 \text{ м.}$$

$$d_{\text{тр}}^4 = \sqrt{\frac{4 \Psi Q_{\text{цс}}^{\text{p.y.}})_{\text{max}}}{p \Psi w \Psi 0}} = \sqrt{\frac{4 \Psi 10,44 + 11,16}{3,14 \Psi 5 \Psi 0}} = 0,17 \text{ м.}$$

Уточнення швидкості повітря у вибраному повітропроводі розраховується за формулою (2.8):

$$w_{\text{ут}}^i = w_{\text{ж}} \frac{d_{\text{тр}}^i}{d_{\text{вн}}^{\text{ДСТУ}}}, \quad (2.8)$$

$$w_{\text{ут}}^1 = w_{\text{ж}} \frac{d_{\text{тр}}^1}{d_{\text{вн}}^{\text{ДСТУ}}} = 15 \frac{0,49}{0,514} = 13,6 \text{ м/с.}$$

$$w_{\text{ут}}^2 = w_{\text{ж}} \frac{d_{\text{тр}}^2}{d_{\text{вн}}^{\text{ДСТУ}}} = 15 \frac{0,12}{0,125} = 13,824 \text{ м/с.}$$

$$w_{\text{ут}}^3 = w_{\text{ж}} \frac{d_{\text{тр}}^3}{d_{\text{вн}}^{\text{ДСТУ}}} = 15 \frac{0,125}{0,125} = 15 \text{ м/с.}$$

$$w_{\text{ут}}^4 = w_{\text{ж}} \frac{d_{\text{тр}}^4}{d_{\text{вн}}^{\text{ДСТУ}}} = 15 \frac{0,17}{0,207} = 10,1 \text{ м/с.}$$

Зведені дані розрахунків бачимо в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 - Результат конструктивних розрахунків повітропроводів

Ділянка	$d_{\text{тр}}$, мм	$d_{\text{тр}}^{\text{ДСТУ}}$, мм	$d_{\text{вн}}^{\text{ДСТУ}}$, мм	$w_{\text{ут}}$, м/с
1	490	530	514	13,6

Продовження таблиці 2.1

2	170	219	207	10,1
3	120	133	125	13,824
4	125	133	125	15

2.2.3 Визначення втрат тиску на всіх ділянках схеми повітропостачання.

Необхідні параметри ділянки представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Параметри ділянки трубопроводів

Ділянка	l , м	p , МПа	t , °C	d , м	w , м/с
1	95	0,6	20	514	13,6
2	48	0,35	40	207	10,1
3	55	0,35	40	125	13,824
4	43	0,35	40	125	15

Проведемо розрахунок для ділянки 1 згідно з [11].

Проведемо розрахунок густини повітря.

$$R = \frac{R_1}{29} = \frac{8314}{29} = 287 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{К)}.$$

$$\rho = \frac{P_1}{RT_1} = \frac{0,6 \cdot 10^6}{287 \cdot 293} = 7,14 \text{ кг/м}^3.$$

Кінематична в'язкість повітря :

$$\nu_1 = f(t) = f(20^\circ) = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Число Рейнольда дорівнює:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d}{\nu_1} = \frac{13,6 \cdot 0,514}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 464170.$$

Для діапазону $1 \cdot 10^5 < Re < 1 \cdot 10^7$, коефіцієнт опору тертя λ визначається за наступною формулою:

$$\lambda_1 = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}}, \quad (2.9)$$

$$\lambda_1 = 0,0032 + \frac{0,221}{(464170)^{0,237}} = 0,013.$$

Довжини труб еквівалентні місцевим опорам визначаються за формулою (2.10).

Засувка – 2 шт., коліно – 2 шт., компенсатор – 1 шт.

а) Засувка:

$$l_{\text{екв.1}} = d \frac{\frac{A_2}{Re} + \zeta_2}{\lambda_1}, \quad (2.10)$$

$$l_{\text{екв.1}} = d \frac{\frac{A_2}{Re} + \zeta_2}{\lambda_1} = 0,514 \cdot \frac{\frac{75}{464170} + 0,15}{0,013} = 5,94 \text{ м.}$$

де значення A_2 і ζ_2 обираються в залежності від типу місцевого опору. Наприклад, для засувки визначаємо $A_2=75$; $\zeta_2=0,15$.

$$l_{\text{екв.1}} = 0,514 \cdot \frac{\frac{75}{464170} + 0,15}{0,013} = 5,94 \text{ м.}$$

б) Коліно:

$$l_{\text{екв.2}} = 0,514 \cdot \frac{\frac{150}{464170} + 0,3}{0,013} = 11,87 \text{ м.}$$

в) Компенсатор:

$$l_{\text{екв.3}} = 0,514 \cdot \frac{\frac{7000}{464170} + 1,3}{0,013} = 52 \text{ м.}$$

Сумарна еквівалентна довжина визначається за наступною формулою:

$$e l_{\text{екв}} = n_{\text{зас.}} l_{\text{екв.1}} + n_{\text{кол.}} l_{\text{екв.2}} + n_{\text{комп.}} l_{\text{екв.3}}, \quad (2.11)$$

$$e l_{\text{екв}} = 2 \cdot 95 + 2 \cdot 11,87 + 52 = 87,62 \text{ м.}$$

Втрата тиску на ділянці 1 визначаються за наступною формулою:

$$p_D = \lambda_1 \cdot \frac{l + e l_{\text{екв}}}{d} \cdot \frac{v_{\text{п}}^2}{2}, \quad (2.12)$$

Тоді:

$$p_D = 0,013 \cdot \frac{95 + 87,62}{0,514} \cdot \frac{7,14^2}{2} = 3049,8 \text{ Па.}$$

Аналогічно були проведені розрахунки для ділянок 2,3,4. Результати зведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Результати розрахунку втрат тиску на ділянках повітропроводів

Ділянка	p , МПа	t , °C	r , кг/м ³	$v \cdot 10^6$, м ² /с	Re	p_D , Па
1	0,6	20	7,14	15,06	464170	3049,8
2	0,35	40	3,9	16,96	123272,4	1322,8
3	0,35	40	3,9	16,96	101886,8	3922,9
4	0,35	40	3,9	16,96	110554,2	3706

2.2.4 Узгодження тисків у вузлових точках

Невідповідність тисків складає [11]:

$$dp = p_3 - p_4 = 3922,9 - 3706 = 216,9 \text{ Па.}$$

Обрахуємо коефіцієнт опору дросельної шайби за наступною формулою:

$$x_{\text{д.ш.}} = \frac{dp}{\frac{\rho}{2} w^2}, \quad (2.13)$$

де ρ - густина повітря; w - швидкість повітря в повітропроводі; dp - невідповідність тисків. Всі ці параметри беруться для ділянки з меншим перепадом тиску.

$$x_{\text{д.ш.}} = \frac{dp}{\frac{\rho}{2} w^2} = 0,49.$$

Знаходимо відношення діаметрів. За знайденим $x_{\text{д.ш.}}$ визначається відношення:

$$\frac{f_{\text{д.ш.}}}{f_{\text{тр}}} = f(x_{\text{д.ш.}}) = f(0,49) = 0,79.$$

Необхідний діаметр шайби:

$$d_{\text{ш}} = d_{\text{тр}} \sqrt{\frac{f_{\text{д.ш.}}}{f_{\text{тр}}}} = 0,125 \sqrt{0,79} = 0,11 \text{ м.}$$

2.2.5 Визначення кількості води для охолодження компресора

Розрахунок для аміачного цеху згідно з [11].

Теплоємність ізохорного процесу визначаються за формулою:

$$c_v = c_p - R, \quad (2.14)$$

$$c_v = 1005 - 287 = 718 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = 0,718 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Масові витрати повітря через компресор визначаються наступною формулою:

$$m_{\text{пов}}^{\text{цп}} = \frac{(Q_{\text{цп}}^{\text{р.у.}})_{\text{МТН}} \Psi_{\text{пов}}}{60}, \quad (2.15)$$

$$m_{\text{пов}}^{\text{цп}} = \frac{9,396 \text{ Вт}, 9}{60} = 0,61 \text{ кг/с}.$$

Проміжний тиск:

$$p_{\text{пр}} = p_1 \sqrt[n]{\frac{p_2}{p_1}} = 0,1 \sqrt[0,35]{\frac{0,35}{0,1}} = 0,19 \text{ Па}.$$

Температура повітря в кінці першого ступеня стиснення визначається за формулою :

$$T_2' = T_1 \sqrt[n]{\frac{p_{\text{пр}}}{p_1}}, \quad (2.16)$$

$$T_2' = 291 \sqrt[0,35]{\frac{0,19}{0,1}} = 343,7 \text{ К}.$$

Питомий тепло відвід розраховуємо за формулою (2.17).

$$q_{1-2}^{\text{охл}} = c_v \frac{(n - k)}{n - 1} (T_2' - T_1), \quad (2.17)$$

де c_V – питома теплоємність повітря ізохорного процесу; k – показник адіабатичного процесу ($k = 1,4$); T_2 – знайдена температура повітря на виході з першого ступеня стиснення.

Тоді отримаємо:

$$q_{1-2}^{\text{охл}} = 0,718 \cdot \frac{(1,35 - 1,4)}{1,35 - 1} \cdot (343,7 - 291) = 5,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Повний тепловідвід буде становити:

$$q = 2 \cdot q_{1-2}^{\text{охл}} = 2 \cdot 5,4 = 10,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Кількість теплоти, яка відводиться від повітря в процесі його стиснення на першій і другій ступенях:

$$q_{\text{ох}} = m_{\text{пов}}^{\text{пл}} \cdot q = 0,61 \cdot 10,8 = 6,6 \text{ кВт}.$$

Кількість теплоти, яка відводиться в проміжному охолоджувачі визначається за наступною формулою:

$$q_{\text{ПО}} = c_p \cdot m_{\text{пов}}^{\text{пл}} \cdot (T_2' - T_1), \quad (2.18)$$

$$q_{\text{ПО}} = 1,128 \cdot 0,61 \cdot (343,7 - 291) = 36,3 \text{ кВт}.$$

Кількість теплоти, яка відводиться в кінцевому охолоджувачі:

$$q_{\text{КО}} = C_p \cdot m_{\text{пов}}^{\text{пл}} \cdot (T_2' - T_5), \quad (2.19)$$

$$q_{\text{КО}} = 1,128 \cdot 0,61 \cdot (343,7 - 313) = 21,1 \text{ кВт}.$$

Повний тепловідвід в процесі стиснення повітря

$$q_{\text{е 2}} = q_{\text{ох}} + q_{\text{ПО}} + q_{\text{КО}} = 6,6 + 36,3 + 21,1 = 64 \text{ кВт}.$$

Кількість охолоджуваної води, необхідної для відводу теплоти від компресора визначається за наступною формулою:

$$m_{\text{води.2}} = \frac{q_{e2}}{C_p^{\text{води}} \Delta t_{\text{води}}}, \quad (2.20)$$

де $\Delta t_{\text{води}}$ – температура води, яка становить 15°C .

$$m_{\text{води.2}} = \frac{64}{4,2 \cdot 15} = 1,02 \text{ кг/с.}$$

Проведемо розрахунок для другого цеху.

Теплоємність ізохорного процесу за формулою (2.14) :

$$c_v = 1005 - 287 = 718 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = 0,718 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Масові витрати повітря через компресор за формулою (2.15) :

$$m_{\text{пов}}^{12} = \frac{10,044 \cdot 0,9}{60} = 0,15 \text{ кг/с.}$$

Проміжний тиск:

$$p_{\text{пр}} = p_1 \sqrt[1]{\frac{p_2}{p_1}} = 0,1 \sqrt[1]{\frac{0,35}{0,1}} = 0,19 \text{ Па.}$$

Температура повітря в кінці першого ступеня стиснення за формулою (2.16):

$$T_2' = 291 \sqrt[1]{\frac{0,19}{0,1}^{1,35-1}} = 343,7 \text{ К.}$$

Питомий тепло відвід буде становити за формулою (2.17):

$$q_{1-2}^{\text{охл}} = 0,718 \cdot \frac{(1,35 - 1,4)}{1,35 - 1} \cdot (343,7 - 291) = 5,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Повний тепловідвід становить:

$$q = 2 \cdot q_{1-2}^{\text{охл}} = 2 \cdot 5,4 = 10,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Кількість теплоти, яка відводиться від повітря в процесі його стиснення на першій і другій ступенях дорівнює:

$$q_{\text{ох}} = m_{\text{пов}}^{\text{п2}} \cdot q = 0,65 \cdot 10,8 = 7,02 \text{ кВт}.$$

Кількість теплоти, яка відводиться в проміжному охолоджувачі за формулою (2.18):

$$q_{\text{по}} = 1,128 \cdot 0,65 \cdot (343,7 - 291) = 48,6 \text{ кВт}.$$

Кількість теплоти, яка відводиться в кінцевому охолоджувачі за формулою (2.19) :

$$q_{\text{ко}} = 1,128 \cdot 0,65 \cdot (343,7 - 313) = 32,5 \text{ кВт}.$$

Повний тепловідвід в процесі стиснення повітря становить:

$$q_{\text{е3}} = q_{\text{ох}} + q_{\text{по}} + q_{\text{ко}} = 7,02 + 48,6 + 32,5 = 88,12 \text{ кВт}.$$

Кількість охолоджуваної води, необхідної для відводу теплоти від компресора визначимо за формулою (2.20):

$$m_{\text{води.3}} = \frac{88,12}{4,2\text{Ц5}} = 1,1 \text{ кг/с.}$$

Сумарні витрати води становлять:

$$m_{\text{е}} = m_{\text{води}}^{\text{ц.1}} + m_{\text{води}}^{\text{ц.2}} = 1,02 + 1,1 = 57,12 \text{ кг/с.}$$

Розрахунок потужності проводиться за наступною формулою:

$$N = \frac{m_{\text{води}}^{\text{е}} \text{Цр}_{\text{води}}}{r_{\text{води}} \text{Ц}_{\text{дв}} \text{Ц}_{\text{пер}} \text{Ц}_{\text{нас}}}, \quad (2.21)$$

де $h_{\text{дв}}$ - ККД двигуна, $h_{\text{дв}} = 0,9$; $h_{\text{пер}}$ - ККД механічної передачі, $h_{\text{пер}} = 0,85$; $\eta_{\text{нас}}$ - ККД насоса, $\eta_{\text{нас}} = 0,6$; $p_{\text{води}} = 0.15 \dots 0.25 \text{ МПа}$.

Тоді :

$$N = \frac{57,12 \cdot 0,2 \cdot 10^6}{1000 \cdot 0,9 \cdot 0,85 \cdot 0,6} = 24888,9 \text{ Вт.}$$

Повні об'ємні витрати води становлять:

$$V_{\text{води}} = 3600 \cdot \frac{m_{\Sigma}}{\rho_{\text{води}}}, \quad (2.22)$$

$$V_{\text{води}} = \frac{57,12 \cdot 3600}{1000} = 216 \text{ м}^3/\text{Год.}$$

Напір насосів подачі води визначається за наступною формулою (2.23):

$$H = \frac{P_{\text{води}}}{\rho_{\text{води}} \cdot g}, \quad (2.23)$$

де $g = 9,8$ - прискорення вільного падіння.

$$H = \frac{0,2 \cdot 10^6}{1000 \cdot 9,8} = 20,4 \text{ м.}$$

За $V_{\text{води}}$ і H із діаграм вибираємо насос. Для $H = 25\text{м}$ і $V = 245 \text{ м}^3/\text{год}$ відповідає насос Д200-36.

2.2.6 Визначення питомих витрат енергії на виробництво стисненого повітря.

Визначення питомих витрат енергії для аміачного цеху [11].

Питома робота стисненого повітря визначається за формулою:

$$l_{\text{пит}} = p_1 \cdot v_1 \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}, \quad (2.24)$$

$$l_{\text{пит}} = 100000 \cdot 0,84 \cdot \ln \frac{0,35}{0,1} = 105232,1 \text{ Вт.}$$

Загальна робота на стиснення повітря визначається:

$$N = l_{\text{пит}} \cdot m_{\text{пов}}^{\text{цл}}, \quad (2.25)$$

$$N = 105232,1 \cdot 0,61 = 64191,6 \text{ Вт.}$$

Витрати енергії на стиснення повітря визначаються за формулою:

$$E_1 = \frac{N}{\eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{т}}}, \quad (2.26)$$

Де $\eta_{\text{т}}$ – ізотермічний ККД, $\eta_{\text{т}} = 0,6$.

$$E_1 = \frac{64191,6}{0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,6} = 132081,5 \text{ Вт} = 132,081 \text{ кВт}.$$

Визначення питомих витрат енергії для другого цеху.

Питома робота стисненого повітря визначається за формулою (2.24):

$$l_{\text{пит}} = 100000 \cdot 0,84 \cdot \ln \frac{0,35}{0,1} = 105232,1 \text{ Вт}.$$

Загальна робота на стиснення повітря визначається формулою (2.25):

$$N = 105232,1 \cdot 0,65 = 68400,9 \text{ Вт}.$$

Витрати енергії на стиснення повітря визначаються за формулою (2.26):

$$E_1 = \frac{68400,9}{0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,6} = 140742,6 \text{ Вт} = 140,742 \text{ кВт}.$$

Сумарні витрати енергії на стиснення повітря:

$$\sum E_1 = 132081,5 + 140742,6 = 272824 \text{ Вт} = 272,824 \text{ кВт}.$$

Витрати енергії на перекачку охолоджувальної води:

$$E_2 = N_{\Sigma \text{НАС}} = 24888,9 \text{ Вт} = 24,888 \text{ кВт}.$$

Витрати енергії на власні потреби компресорної станції:

$$E_3 = 0,01 \cdot (E_1 + E_2) = 0,01 \cdot (272824 + 24888,9) = 2977,12 \text{ Вт} = 2,97 \text{ кВт}.$$

Повні витрати енергії на виробництво стисненого повітря:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 = 272824 + 24888,9 + 2977,12 = 300690,02 \text{ Вт} = 300,690 \text{ кВт}.$$

Питомі витрати енергії, які витрачаються на стиснення 1 м³ повітря за нормальних умов:

$$E_{\text{пит}} = \frac{E \cdot 10^{-3}}{60 \cdot Q_{\text{н.у.}}} = \frac{300690 \cdot 10^{-3}}{60 \cdot 561,854} = 0,01 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3.$$

2.3 Вибір та обґрунтування можливих заходів енергозбереження для системи стисненого повітря.

Системи стисненого повітря безпечні, надійні і універсальні, але їх зазвичай приймають як належне, не думаючи про витрати. Стиснене повітря є важливим ресурсом для промисловості, його часто ставлять на четверте місце після електроенергії, газу і води. Однак, на відміну від перших трьох, стиснене повітря виробляється на місці, тому у споживача значно більше можливостей контролювати його споживання і витрати на його виробництво. Прості, ефективні і маловитратні заходи дозволяють зекономити до 30% витрат на виробництво і розподіл стисненого повітря [6].

Навіщо потрібні заходи по зниженню витрат в системах стисненого повітря. Є три важливих причини, задля яких варто витрачати час і сили на зниження витрат в системах стисненого повітря:

- виявлення і усунення витоків і нераціонального використання зекономить енергію і гроші;

- підвищуються надійність і експлуатаційні параметри систем стисненого повітря;
- зниження електроспоживання і, відповідно, зниження викидів вуглекислого газу зменшує шкідливий вплив на навколишнє середовище.

Добре спроектована і належним чином експлуатована енергоефективна система стисненого повітря може приносити споживачеві десятки і навіть сотні тисяч гривень щорічної економії. Крім того, вона може мінімізувати ризик скорочення виробництва, забезпечуючи надійність подачі повітря, і вирішити проблеми охорони праці та здоров'я при роботі з системами, що перебувають під тиском. Кожна гривня економії на енергетичних витратах приносить постійну подальшу економію, ефективно збільшуючи прибуток. Розглянемо декілька заходів із покращення роботи системи стисненого повітря детальніше [12].

2.3.1 Заміна редуктора в системі двигун-компресор

Проблема зводиться до того, що електрична енергія доступна на фіксованій частоті (50 Гц), а механічна енергія потрібна в широкому спектрі частот (швидкостей). До складу загальної схеми електроприводу входять перетворювач або механічний редуктор, муфта, редуктор і робочий орган, який є частиною робочої машини. Орієнтовні значення ККД елементів приводу складають: перетворювач – 0,6 – 0,98 (менше значення для малих швидкостей обертання, більше для більш високих швидкостей); двигун – 0,7 – 0,95 (менше значення для мікро машин, більші - для машин підвищеної потужності); механічний редуктор – 0,9 – 0,95; муфта – 0,99; редуктор – 0,95; робочий механізм – 0,95.

Коефіцієнт корисної дії системи електроприводу складається з добутку ККД складових системи. На підприємстві сумарний ККД системи складає – 0,65 – 0,75 в залежності від режиму роботи, при цьому в середньому від 7 до 10 % потужності втрачається в механічних передачах. Таким чином виключення механічних передач із складу системи електроприводу приводить до суттєвого підвищення ККД системи (на 7 – 10 %), що є одним із пріоритетних напрямів

розвитку електроприводів. Але введення такої системи на підприємстві потребує значної перебудови всієї системи отримання холоду. Тому пропонується заміна старих редукторів на нові, із-за невірного використання редукторів, на компресорі встановлена система з редукторів, з значно перевищеним маховим моментом пропонується їх заміна на один, який відповідає потрібному діапазону швидкостей та крутячому моменту [17].

Витрата електричної енергії за рік становить:

$$W_1 = P k_b \Psi, \quad (2.27)$$

де k_b – коефіцієнт використання, $k_b = 0,7$.

$$W_1 = 600 \cdot 0,7 \cdot 8760 = 3679200 \text{ кВт Чод},$$

Зменшення витрат електричної енергії:

$$DW = P k_b \Psi \cdot 0,07, \quad (2.28)$$

$$DW = 600 \cdot 0,7 \cdot 8760 \cdot 0,07 = 257544 \text{ кВт Чод},$$

Економія буде становити:

$$E = DW \cdot b, \quad (2.29)$$

де b - тариф на електроенергію на 2018 рік.

$$E = 257544 \cdot 0,27 = 584624,88 \text{ грн}$$

Капітальні витрати на придбання та встановлення редуктору складуть 60050 грн.

Простий термін окупності проекту складе:

$$T_{\text{ок}} = \frac{KB}{E}, \quad (2.30)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{60050}{584624,88} = 0,12 \text{ року.}$$

Отже, простий термін окупності даного заходу становить 0,12 року, тобто 1,5 місяця.

2.3.2 Використання холодного зовнішнього повітря для живлення компресора

Ефектом від впровадження даного заходу з енергозбереження є скорочення витрат, що йдуть на виробництво стисненого повітря та простота установки.

У багатьох випадках головна компресорна установка розміщується поряд з основними споживачами стислого повітря з метою зниження втрат при транспортуванні стислого повітря по трубопроводах. Як наслідок, компресорні установки часто знаходяться в підземних або внутрішніх приміщеннях виробничих об'єктів. При цьому, як правило, доступ свіжого зовнішнього повітря до компресорів обмежений, і для роботи використовується повітря приміщень, температура якого зазвичай перевищує температуру зовнішнього повітря. Згідно із законами термодинаміки, стискування теплого повітря вимагає більших затрат енергії, чим холодного. У технічній літературі наголошується, що кожні 5°C підвищення температури на вході компресора вимагають збільшення споживаної потужності приблизно на 4%. Тому зниження енергоспоживання може бути досягнуте за допомогою простої організації живлення компресора зовнішнім повітрям, особливо в зимовий період, коли в багатьох районах різниця між температурою зовнішнього повітря і температурою у приміщеннях може перевищувати 5°C у декілька разів. Підведення зовнішнього повітря до компресора або компресорною в цілому може бути організовано за допомогою

повітропроводу. Залежно від довжини останнього, може знадобитися установка додаткового вентилятора, енергоспоживання якого має бути враховане при плануванні даного заходу. Повітрозабірна установка повинна знаходитися на північній стороні об'єкту або, принаймні, в місці, яке більшу частину часу знаходиться в тіні [17].

Оскільки при роботі компресора утворюється значна кількість тепла, в компресорних завжди спостерігається підвищена температура незалежно від того, чи організована утилізація цього тепла. Досить часто температура повітря в компресорних навіть в зимовий період досягає 30-35°C. Чим більше різниця між температурою в приміщенні і температурою зовнішнього повітря, тим більше потенціал енергозбереження. При цьому слід мати на увазі, що об'єми енергозбереження пропорційні часу роботи компресора.

Зниження температури повітря, що поступає в компресор, за рахунок холодного зовнішнього повітря можливо практично в будь-яких умовах. Інколи досить виконати в зовнішній стіні круглий отвір, з'єднавши його з компресором за допомогою повітропроводу. Якщо розташування компресорної робить подачу зовнішнього повітря неможливою, слід поліпшити її вентиляцію. Згідно з оцінками, подібні заходи застосовні в 50% випадків. Організація подачі холодного зовнішнього повітря не спричиняє за собою значних витрат, оскільки атмосферне повітря є безкоштовним, і пов'язана з такими економічними перевагами, як скорочення часу роботи компресорів або споживаною ними електричній потужності [17].

При зниження температури споживаного повітря на 5°C спостерігається зниження енергоспоживання до 4%. Таким чином щорічне енергозбереження за формулою (2.28) складає:

$$DW = 600 \cdot 0,7 \cdot 8760 \cdot 0,04 = 147168 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Щорічна економія витрат становитиме за формулою (2.29):

$$E = 147168 \text{ ₴} - 113767,27 = 33401,36 \text{ грн}$$

Якщо передбачати установку додаткового вентилятора та повітроводу, то вартість заходу складе 45000 грн, у вартість входить монтаж та налагоджувальні роботи.

Простий термін окупності проекту складе за формулою (2.30):

$$T_{\text{ок}} = \frac{45000}{33401,36} = 0,15 \text{ року.}$$

Отже, простий термін окупності даного заходу становить 0,15 року, тобто майже 2 місяця.

2.3.3 Встановлення сучасного енергоефективного електродвигуна з меншою потужністю

На підприємстві встановлений двигун потужністю 600 кВт. Згідно проведених вище розрахунків можна зробити висновок, що необхідно вибрати електродвигун потужністю в два рази менше. Обираємо електродвигун серії ALM, потужністю 300 кВт. Його ціна становить біля 28,5 тис. євро. Перевівши в гривні, його ціна становить 912500 грн.

За рік новий електродвигун споживатиме наступну кількість енергії за формулою (2.27):

$$W_2 = 300 \text{ кВт} \cdot 760 \text{ год} = 1839600 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Зменшення витрат електричної енергії становить :

$$DW = W_1 - W_2 = 3679200 - 1839600 = 1839600 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Економія буде становити за формулою (2.29):

$$E = 147168 \mathfrak{U}_{27} = 1839600 \mathfrak{U}_{27} = 4175892 \text{ грн}$$

Визначимо простий термін окупності для впровадження системи опалення на основі утилізованого тепла.

Капітальні затрати впровадження даного проекту складаються з вартості труб та їх монтажу, а також із вартості теплообмінника. На закупку труб та їх монтаж було витрачено 550 тис. грн., а ціна теплообмінника становить 48 тис. грн.

Розрахуємо капітальні затрати:

$$KЗ = KЗ_{\text{т}} + KЗ_{\text{ін}}, \quad (2.32)$$

де $KЗ_{\text{т}}$ – ціна теплообмінника; $KЗ_{\text{ін}}$ - затрати, що включають монтаж та ціну труб.

$$KЗ = 550000 + 48000 = 598000 \text{ грн.}$$

Економію розрахуємо як різницю між оплатою теплової енергії при різних варіантах опалення:

$$E = 1031379,25 - 0 = 1031379,25 \text{ грн.}$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{598000}{1031379,25} = 0,58 \text{ року.}$$

Отже, простий термін окупності даного заходу становить 0,58 року, тобто 7 місяців.

2.3.5 Усунення витоків стисненого повітря в системі

Стиснене повітря – це дуже корисний і цінний енергоносіє, яким потрібно управляти для продуктивної роботи системи. Інвестиції, що вкладаються у виробництво стисненого повітря, яке, не виконуючи жодної корисної роботи, втрачається через витоки, є марними витратами. Ці втрати можна звести до мінімуму шляхом впровадження програми виявлення та усунення витоків. Таким

чином, пропонується одна з найбільших можливостей для енергозбереження. Критична проблема полягає в тому, щоб максимально точно виявити і вказати точку, де виникають витоки повітря в системі. За рахунок зменшення цих витоків в системі можна заощадити електроенергію та гроші, також можна продовжити життєвий цикл обладнання та цілком можливо підвищити продуктивність праці. Крім втрат енергії, витоки стисненого повітря можуть також сприяти іншим операційним втратам. Витоки зазвичай спричиняють падіння тиску в системі - знижує ефективність повітроводів, а також впливає на виробництво. Змушуючи обладнання працювати більше, витоки також можуть скоротити термін служби більшості обладнання (включаючи компресор та допоміжне устаткування). Збільшений час роботи, у свою чергу, призведе до збільшення технічного обслуговування та позапланових простоїв. Зрештою, витоки також можуть призвести до додавання непотрібних потужностей компресора. Кількість втрат повітря через невеликі отвори, тріщини, герметичні муфти, з'єднання тощо в сумі досягає великих об'ємів. При належному встановленні та обслуговуванні витоки втрати не повинні перевищувати більше 5% від загальної місткості компресора [13].

Для виявлення витоків стисненого повітря застосовується ультразвуковий детектор, який допомагає максимально точно виявити місце та розмір нещільностей в системі. Величина витoku напряду залежить від тиску в системі та діаметру отвору. Витрати електроенергії на витоки стисненого повітря згідно з [17] визначаються за формулою, кВт·год:

$$DW = a \cdot \eta_n \cdot \eta_w \cdot \eta_{k_b}, \quad (2.33)$$

де a – коефіцієнт витрати повітря крізь нещільності арматури та трубопроводів, м³/хв (табл.2.4.); n – кількість точок, де необхідно усунути витоки стисненого повітря, шт; w – питома витрата електричної енергії на вироблення 1 м³ стисненого повітря, кВт·год; t – час, протягом якого система знаходиться під тиском, год; k_b – коефіцієнт використання, $k_b = 0,7$.

Таблиця 2.4 – Втрати повітря через нещільності в арматурі [17]

		Діаметр отвору, мм							
		2	4	6	8	10	12	14	16
Тиск, кгс/м ²	2	0,2	0,4	0,8	1,3	2,5	3,5	5,0	7,0
	3	0,4	0,7	1,2	2,1	3,5	5,0	7,0	9,0
	4	0,6	1,0	1,5	3,0	4,5	6,5	9,0	11,5
	5	0,8	1,2	1,8	3,5	5,0	7,8	11,0	13,5
	6	1,0	1,4	2,2	4,0	6,0	9,0	12,0	16,0

За попереднім обстеженням системи стисненого повітря було виявлено місця та розміри нещільностей арматури та трубопроводів. В даному заході пропонуємо усунення витоків стисненого повітря за рахунок заміни обладнання і трубопроводів та ущільнення з'єднань, де це необхідно згідно з обстеженням.

При цьому витрати на обстеження системи складають 20000 грн, а на усунення виявлених витоків (включаючи вартість деталей, використаних для заміни, і оплату праці) – 55000 грн.

Визначимо економію електроенергії після впровадження даного заходу:

$$DW = (1\text{Ч}0,01\text{Ч}760\text{Ч}0,7) + (2,2\text{Ч}0,01\text{Ч}760\text{Ч}0,7) + (4\text{Ч}0,01\text{Ч}760\text{Ч}0,7) = 72848,16\text{кВт Чод.}$$

Щорічна економія витрат становитиме за формулою (2.29):

$$E = 72848,16\text{Ч}2,27 = 165365,3 \text{ грн.}$$

Термін простої окупності проекту складе за формулою (2.30):

$$T_{\text{ок}} = \frac{75000}{165365,3} = 0,45 \text{ року.}$$

Отже, простий термін окупності даного заходу становить 0,45 року, тобто 5,5 місяців.

Висновки до розділу

1. Досліджено схему постачання стисненого повітря хімічного підприємства та розраховано її основні параметри. Визначено, що потреби у стисненому повітрі з часів проектування компресорної станції значно знизилися.

2. На основі отриманих результатів розрахунків були запропоновані до впровадження заходи з підвищення рівня енергоефективності, а саме: заміна редуктора в системі двигун-компресор, використання холодного зовнішнього повітря для живлення компресора, встановлення сучасного енергоефективного електродвигуна з меншою потужністю, утилізація теплоти, яка виділяється при виробництві стисненого повітря, усунення витоків стисненого повітря в системі. Результати основних розрахунків наведених вище заходів зведемо до таблиці 2.5.

3. Кожен із запропонованих шляхів модернізації системи стисненого повітря має термін окупності менше одного року. Це спричинено саме тим, що за теперішньої ціни на енергоресурси, навіть при значних капіталовкладеннях, економія, яка досягається при їх впровадженні, майже покриває їх затрати.

Таблиця 2.5 – Запропоновані заходи з енергозбереження

№ п/п	Назва заходу з енергозбереження	Річна економія електроенергії, кВт·год.	Річна економія витрат, грн.	Капітальні затрати, грн	Простий термін окупності, років
1	Заміна редуктора в системі двигун-компресор	257544	584624,88	60050	0,12
2	Використання холодного зовнішнього повітря для живлення компресора	147168	334071,36	45000	0,15
3	Встановлення сучасного енергоефективного електродвигуна з меншою потужністю	1839600	4175892	912500	0,25
4	Утилізація теплоти, яка виділяється при виробництві стисненого повітря	-	1031379,25	598000	0,58
5	Усунення витоків стисненого повітря в системі	72848,16	165365,3	75000	0,45

3 ОЦІНКА ТА КОНТРОЛЬ РІВНЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ПОСТАЧАННЯ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ ШЛЯХОМ ВСТАНОВЛЕННЯ БАЗОВОГО РІВНЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

3.1. Побудова систем контролю і планування споживання електричної енергії

Останні роки в країнах Європи для управління ефективністю використання електричної енергії широко застосовуються системи контролю і планування електроспоживання (КіП), відомих під назвою Monitoring and Targeting Systems [22].

Функції традиційних систем КіП полягають у наступному:

- аналіз існуючого рівня ефективності використання електричної енергії та стану електроспоживаючого обладнання;
- оперативне планування та прогнозування майбутнього рівня споживання електроенергії;
- нормалізація споживання електричної енергії за допомогою встановлення «стандартів» витрат та контролю їх виконання.

Побудова систем КіП базується на залежності обсягів споживання електроенергії від факторів, що характеризують протікання виробничого процесу. Відповідно «стандарт» споживання електроенергії в загальному випадку є деякою математичною моделлю, яка відображає залежність величини споживання енергії від факторів, що мають найбільший вплив на витрату енергії на об'єкті [22].

«Стандарт» споживання електроенергії може бути встановлений у вигляді константи якщо виявлено, що жоден з існуючих технічних або виробничих показників не має суттєвого впливу на обсяг споживання. У випадку, коли фактори, що впливають на величину споживання, наявні, то «стандарт» встановлюється у вигляді багатфакторної або ж однофакторної лінійної регресії.

Однак в традиційних методиках встановлення «стандарту» не рекомендується використовувати більше трьох впливових факторів.

Традиційні системи КіП не доцільно використовувати для безпосереднього контролю ефективності енерговикористання на будь-якому об'єкті [22]. Дані системи є дієвим засобом для оперативного контролю ефективності впровадження заходів з енергозбереження. Тобто до початку функціонування системи КіП необхідно встановити відповідний «стандарт» електроспоживання та реалізувати на даному об'єкті захід з підвищення рівня енергоефективності.

Функціонування системи КіП умовно ділиться на два етапи. Перший етап – це збір статистичних даних, який включає оцінку та загальний аналіз стану об'єкту, визначення основних закономірностей процесу енергоспоживання. Даний етап може бути досить тривалим, оскільки крім обстеження енергообладнання, відбору чинників, включає збір кількісних статистичних даних: величини споживання енергоресурсів, зміни значень відібраних параметрів. На даному етапі впровадження системи КіП великою перевагою є достатня кількість засобів обліку на об'єкті: лічильників електричної енергії, витрат енергоносіїв, датчиків контролю основних кількісних показників технологічного процесу тощо. Тривалість та трудомісткість цього етапу в значній мірі залежать також від наявності та об'єму статистичних даних, що фіксувалися та зберігалися на об'єкті дослідження до впровадження системи контролю і планування. Ці дані можуть бути використані як передісторія для побудови математичної моделі енергоспоживання [22].

Другим етапом є власне побудова математичної моделі «стандарту» енергоспоживання та контроль за його виконанням. Після встановлення «стандарту» енергоспоживання система КіП починає функціонувати і при цьому завданням виробничого персоналу є забезпечити, щоб фактичний обсяг споживання палива чи енергії не перевищував встановленого «стандарту», що свідчить про дотримання запланованого рівня ефективності енерговикористання.

Подальша робота системи КіП після встановлення «стандарту» енергоспоживання полягає у періодичному його контролі та внесенні за

необхідності коректив у роботу відповідного обладнання. При цьому знаходження зафіксованих при контролі рівнів споживання ПЕР нижче «стандартного» свідчить про нормальну роботу енергообладнання, якщо ж спостерігається його перевищення, то це є сигналом погіршення якості споживання енергоресурсів і потрібно знайти та усунути його причини[22]..

Традиційні системи контролю і планування енергоспоживання мають ряд недоліків та спрощень, які не дозволяють у повній мірі використовувати закладений в них принцип контролю і, відповідно, досягати найкращих результатів їх використання.

У традиційних системах КіП «стандарти» енергоспоживання встановлюються, як правило, у вигляді константи або лінійного рівняння регресії.

Такі стандарти є занадто простими, оскільки в реальних умовах на процес енергоспоживання на об'єктах суттєво впливають численні та різноманітні фактори, причому характер впливу багатьох із них на витрати енергії часто є нелінійним [22].

Точність будь-якої математичної моделі, побудованої за вибірковими статистичними даними, як, зокрема, і моделі енергоспоживання, носить імовірнісний характер. Тому під час контролю виконання «стандарту» енергоспоживання, встановленого на основі такої моделі, виникають питання [22]:

- Чи є його невиконання результатом зниження (підвищення) ефективності використання енергії на досліджуваному об'єкті, чи воно являється наслідком недосконалості самого «стандарту»?
- Чи в повній мірі відображає «стандарт» зміну рівня споживання енергії зв'язку зі зміною величини врахованих факторів або внаслідок неправильного уявлення про вплив на досліджуваний процес та неврахування основних змінних, коли результати не відповідають дійсності?

Отже, зазначені недоліки, які характерні для систем КіП, не дозволяють вважати діючі методики їх побудови і функціонування у достатній мірі об'єктивними та обґрунтованими. Тому існує необхідність у врахуванні вказаних недоліків при розробці нової, більш досконалої методики створення подібних систем [22].

3.2 Вибір факторів, які впливають на споживання електричної енергії

Кількість факторів, які мають вплив на величину споживання електричної енергії на об'єктах промисловості, дуже велика. Тому при моделюванні значущою проблемою є питання відбору найбільш вагомих для моделі факторів. Скорочення числа факторів призначено зменшити розмірність моделі для того, щоб видалити з неї всі незначні фактори, які не несуть у собі якоїсь корисної для аналізу інформації, тим самим спростити модель. Разом з тим важливо максимально повно врахувати всі впливові фактори, оскільки від цього значно залежить достовірність і точність моделі обсягів споживання електроенергії [24].

Очевидно, що одним з можливих рішенням проблеми відбору могла б стати побудова моделі з урахуванням усіх можливих факторів. Однак таке рішення можливе лише за наявності незначної кількості факторів. У разі ж щодо великого списку факторів подібна методика представляється досить складною, оскільки кількість моделей, які необхідно буде побудувати, виявляється вкрай великою. Тому при відборі факторів дуже важливим є скорочення їх початкового обсягу зі збереженням усіх значущих аргументів.

При відборі істотних факторів використовуються два основних типи методів [25] :

- статистичні, що дозволяють на підставі наявних статистичних даних кількісно оцінити ступінь впливу факторів один на одного і на споживання електричної енергії;
- експертні, при яких досвід спеціалістів та знання суті досліджуваного об'єкта дозволяють оцінити істотні фактори.

На результат функціонування системи впливають фактори, які піддаються прямому та кількісному виміру, і які не піддаються - порядкові та класифікаційні. В статистичних методах відбору для них дослідник встановлює кілька градацій шкали вимірювань (рівнів). До статистичних методів відбору факторів відносяться метод виключення та метод включення. Метод виключення передбачає побудову рівняння, що включає всю сукупність факторів, з подальшим послідовним (покроковим) скороченням числа факторів в моделі до тих пір, поки не виконається деяка наперед задана умова. Суть методу включення - в послідовному включенні факторів в модель до тих пір, поки регресійна модель не відповідатиме заздалегідь встановленим критеріям якості [25].

Використання методу експертних оцінок дозволяє не лише розглянути множину аспектів та факторів, але й об'єднати різні підходи, за допомогою яких інженер, економіст, менеджер, науковець знаходять найкращі рішення.

Надійність рішень, які приймаються на основі суджень груп експертів, у значній мірі залежить від організації та спрямованості процедури збору, аналізу й математичної обробки цих суджень.

Рішення груп експертів суттєво відрізняються від рішень, які формуються у результаті дискусій на засіданнях комісій, де думка авторитетних учасників засідань чинить значний вплив на судження інших. Це, звичайно, не означає, що індивідуальними думками спеціалістів та рішеннями комісій слід нехтувати. Однак інформація, отримана від групи експертів і відповідним чином оброблена, виявляється, як правило, більш достовірною та надійною [24].

Експертні оцінки є важливим джерелом інформації у процесі вивчення технологічних об'єктів і вибору змінних, які визначають характер їх функціонування. Вони враховують досвід, інтуїцію та знання спеціалістів щодо об'єкту дослідження і формуються на основі результатів найновіших, ще не опублікованих наукових праць, виконаних кожним експертом, і незважаючи на їхню суб'єктивність, містять корисну об'єктивну інформацію, що, зокрема, надає можливість оцінити ступінь впливу кожного досліджуваного фактора [26].

Реалізація методу експертних оцінок передбачає виконання наступних етапів [26]:

1. Формулювання мети дослідження й формування групи досліджуваних факторів (попереднє)
2. Формування групи експертів
3. Вибір методу опитування експертів
4. Проведення опитування
5. Математична обробка отриманих даних
6. Аналіз результатів та висновки

Звичайно, зміст і структура кожного з етапів даного методу може змінюватися й зазнавати корекції у залежності від мети й завдань дослідження, особливостей об'єкту чи системи, для яких проводиться, галузі наукового пізнання, до яких відноситься.

Для побудови моделі обсягів споживання електричної енергії системою постачання стисненого повітря доцільним є використання спеціальних професійних знань та досвіду спеціалістів, які працюють на досліджуваному об'єкті, що можуть бути узагальнені за допомогою методу експертних оцінок [22].

З метою відбору найбільш впливових факторів на величину споживання електричної енергії було проведене експертне опитування фахівців підприємства, яким було роздано анкети з переліком факторів, вплив яких необхідно оцінити.

Розглянемо алгоритм методу [26] :

1. Вибір експертів:

Визначено 7 експертів серед яких проводиться опитування. Вагові коефіцієнти вважаються рівними.

2. Постановка задачі:

Експертам пропонується визначити, які з наведених факторів найбільше впливають обсяг споживання електричної енергії системою постачання стисненого повітря. Впливовість факторів оцінюється шкалою від 1 до 8 у

порядку зростання впливу (тобто найменш впливовий фактор – має оцінку 1). До розгляду пропонуються наступні фактори:

- тиск повітря в трубопроводі;
- вологість повітря, що надходить до системи ;
- об'єми виробництва стисненого повітря;
- температура повітря, що надходить до системи;
- коефіцієнт використання встановленої потужності;
- атмосферний тиск;
- тривалість роботи компресора за добу;
- температура зовнішнього повітря.

Усі експерти присвоїли кожному з факторів ранги від 1 до 8.

3. Виявлення думок кожного експерта:

Результати оцінювання зведені до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Оцінки експертів

Експерти	Фактори, що впливають на обсяг споживання електричної енергії системою постачання стисненого повітря							
	Об'єми виробництва стисненого повітря	Вологість повітря, що надходить до системи	Тиск повітря в трубопроводі	Температура повітря, що надходить до системи	Коефіцієнт використання встановленої потужності	Атмосферний тиск	Тривалість роботи компресора за добу	Температура зовнішнього повітря
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	5	3	4	8	2	6	7	1
2	7	5	4	6	2	1	8	3
3	8	3	6	4	7	5	1	2
4	7	2	6	4	1	3	5	8
5	8	5	2	7	6	1	4	3
6	6	7	2	5	3	8	1	4
7	3	1	5	7	6	4	2	8
$\sum X_i$	44	26	29	41	27	28	28	29

Продовження таблиці 3.1

L	12,5	-5,5	-2,5	9,5	-4,5	-3,5	-3,5	-2,5
L^2	156,25	30,25	6,25	90,25	20,25	12,25	12,25	6,25
D_j^2	19,43	25,43	16,86	14,86	34,86	40,00	48,00	46,86

4. Виявлення переважної думки експертів:

Середнє значення суми рангів:

$$a = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k X_{ij} = \frac{1}{8} \cdot (44 + 26 + 29 + 41 + 27 + 28 + 28 + 29) = 31,5,$$

де k – кількість факторів.

5. Розрахунок відхилення думки експертів від середньої оцінки за наступною формулою:

$$L_j = \sum X_j - a \quad (3.1)$$

6. Оцінка погодженості думок експертів. Згідно з [26] для оцінки погодженості думок експертів використовують коефіцієнт конкордації:

$$W = \frac{12 \sum_{j=1}^k L_j^2}{m^2 (k^3 - k)} ; \quad (3.2)$$

де m – кількість експертів.

Розраховуємо коефіцієнт конкордації за формулою (3.2):

$$W = \frac{12 \cdot (156,25 + 30,25 + 6,25 + 90,25 + 20,25 + 12,25 + 12,25 + 6,25)}{7^2 \cdot (8^3 - 8)} = 0,162.$$

7. Розрахунок критерію Пірсона. Для оцінки коефіцієнта конкордації використовують статистичний критерій Пірсона, який визначається за наступною формулою:

$$\chi^2 = m(k-1)W; \quad (3.3)$$

$$\chi^2 = 7 \cdot (8-1) \cdot 0,162 = 7,952.$$

8. Розраховане значення критерію Пірсона необхідно порівняти з критичним значенням. При $\chi^2 \geq \chi_{кр}^2$ думки експертів вважаються погодженими і ранг фактора в зведеній таблиці відповідає силі його впливу на величину споживання електроенергії [22].

За таблицею значення критерію Пірсона за рівнем значимості похибки $p=0,05$ та числом ступенів свободи $f = k - 1 = 8 - 1 = 7$ становить $\chi_{кр}^2 = 14,1$. Порівнюючи χ^2 та $\chi_{кр}^2$ бачимо, що критичне значення критерію Пірсона значно перевищує розраховане. Це вказує на те, що думки експертів щодо впливу наведених факторів на величину споживання електричної енергії не є погодженими. Отже надалі необхідно виключити зі списку фактор, щодо якого думки експертів розходяться найбільше. Для оцінки розсіювання думок експертів використовуємо дисперсію значень рангів, що присвоєні експертами кожному фактору [22]:

$$D_j^2 = \sum_{j=1}^m (x_{ij} - \overline{x_j})^2; \quad (3.4)$$

де $\overline{x_j}$ – середнє значення оцінок, присвоєних експертами j – му фактору.

Розрахунок дисперсії проводимо за допомогою MS Excel та зводимо результати до таблиці 3.1. Найбільше значення дисперсії має сьомий фактор. Отже розсіювання оцінок експертів щодо даного фактору є найбільшим, тому виключаємо сьомий фактор із подальшого розгляду.

Формуємо нову таблицю, корегуючи ранги пропорційно початковим значенням таким чином, щоб у кожному рядку був натуральний ряд чисел. Нові значення наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Експерти	Фактори, що впливають на обсяг споживання електричної енергії системою постачання стисненого повітря						
	Об'єми виробництва стисненого повітря	Вологість повітря, що надходить до системи	Тиск повітря в трубопроводі	Температура повітря, що надходить до системи	Коефіцієнт використання встановленої потужності	Атмосферний тиск	Температура зовнішнього повітря
	1	2	3	4	5	6	8
1	5	3	4	7	2	6	1
2	7	5	4	6	2	1	3
3	7	2	5	3	6	4	1
4	6	2	5	4	1	3	7
5	7	4	2	6	5	1	3
6	5	6	1	4	2	7	3
7	2	1	4	6	5	3	7
$\sum X_i$	39	23	25	36	23	25	25

Далі аналогічним чином проводимо розрахунок і виключаємо поступово фактори до тих пір, поки не буде досягнуте узгодження думок експертів. Результати виключення факторів, розраховані значення коефіцієнту конкордації та критерію Пірсона зводимо до таблиці 3.3.

В результаті експертного оцінювання було визначено, що найбільший вплив на величину споживання електроенергії системою постачання стисненого повітря здійснюють наступні чотири фактори: об'єм виробництва стисненого повітря, вологість повітря, що надходить до системи, тиск повітря в трубопроводі, температура повітря, що надходить до системи. Саме дані фактори слід надалі використовувати при побудові базового рівня споживання електроенергії.

Таблиця 3.3 – Результати виключення факторів

Номер фактора, що виключається	Коефіцієнт конкордації після виключення факторів, W	Розрахункове значення критерію Пірсона після виключення факторів, χ^2	Критичне значення критерію Пірсона після виключення факторів, $\chi^2_{кр}$	Результат порівняння розрахункового та критичного значення критерію Пірсона
7	0,191	8,02	12,6	Думки не узгоджено
8	0,242	8,469	11,1	Думки не узгоджено
6	0,318	8,914	9,5	Думки не узгоджено
5	0,429	9,0	7,8	Думки узгоджено

3.3. Встановлення базового рівня споживання електричної енергії

Після відбору факторів, що суттєво впливають на величину електроспоживання необхідно побудувати математичну модель споживання електричної енергії. Дану побудову будемо здійснювати за допомогою методики багатфакторного регресійного аналізу на основі статистичних даних, які щоденно вимірювалися протягом місяця роботи системи постачання стисненого повітря (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Вихідні статистичні дані

День місяця	Фактори				Значення функції
	Об'єми виробництва стисненого повітря, m^3	Тиск повітря в трубопроводі, атм	Температура повітря, що надходить до системи, $^{\circ}C$	Вологість повітря, що надходить до системи, %	Споживання електричної енергії, кВт·год
1	120129	2,480	20,0	88	9869,90
2	112885	2,050	20,0	86	9923,60
3	118641	2,160	18,0	81	10486,40
4	139947	2,330	10,0	83	11634,90
5	219149	4,900	10,0	85	13592,00

Продовження таблиці 3.4

6	226530	3,430	10,0	87	18398,20
7	210235	3,220	10,0	95	17166,90
8	209281	3,100	10,0	97	16722,70
9	189594	3,000	10,0	99	15642,10
10	191935	2,760	10,0	99	15736,00
11	215672	4,000	17,0	95	18572,00
12	196800	3,300	20,0	89	16695,50
13	201521	3,400	19,0	93	16466,50
14	134633	3,600	19,0	96	17426,40
15	207910	3,730	19,0	87	14716,70
16	177721	2,900	19,0	78	11554,50
17	180014	2,780	19,0	74	12673,70
18	209079	3,230	25,0	73	12826,40
19	221941	5,350	35,0	61	11866,50
20	159494	2,600	35,0	64	13644,70
21	176782	3,000	41,0	79	12665,20
22	181402	3,400	41,0	56	14715,20
23	207689	3,820	41,0	71	15582,00
24	167274	2,580	41,0	75	13208,60
25	197341	3,600	38,0	79	17771,70
26	197363	3,600	38,0	78	18044,60
27	186670	4,000	33,0	83	15648,70
28	120742	4,000	33,0	86	12206,50
29	117707	3,600	38,0	90	14952,30
30	146959	4,130	38,0	85	18026,80
31	184025	4,400	38,0	91	17975,20

Для побудови математичної моделі електроспоживання застосовуємо пакет «Аналіз даних» в MS Excel. Для розрахунку задаємо рівень надійності 95%, результати представлено на рисунку 3.1.

Згідно з [27] після побудови моделі лінійної регресії проводиться оцінка значущості регресійного рівняння в цілому та окремих його параметрів. Для цього проаналізуємо отримані результати розрахунків. В результатах розрахунків представлено «*P-value*», який характеризує вірогідність помилкового рішення. Оскільки рівень надійності був заданий 95%, то прийнятність відповідного параметра можлива за умови $P\text{-value} < 0,05$. В результатах бачимо, що значення P для другого фактора перевищує заданий рівень надійності, а отже прийнятність

даного фактора неможлива. Тому виключаємо з розгляду другий фактор і аналогічним чином повторюємо розрахунок. Результати покажемо на рисунку 3.2.

Regression Statistics								
Multiple R	0,789808455							
R Square	0,623797395							
Adjusted R Square	0,565920071							
Standard Error	1756,543888							
Observations	31							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	4	133018828,1	33254707	10,77792396	2,75405E-05			
Residual	26	80221607,19	3085446,43					
Total	30	213240435,3						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
Intercept	-12526,28026	4447,556453	-2,816441	0,009145507	-21668,36348	-3384,19704	-21668,36348	-3384,197041
X Variable 1	0,047091079	0,011514686	4,0896538	0,00036991	0,023422303	0,070759855	0,023422303	0,070759855
X Variable 2	94,51913962	542,1105817	0,17435398	0,862937815	-1019,80512	1208,843399	-1019,80512	1208,843399
X Variable 3	129,1965861	39,51603609	3,26947232	0,003031138	47,97021063	210,4229616	47,97021063	210,4229616
X Variable 4	183,6824453	38,74376574	4,74095488	0,0000665929	104,0434942	263,3213963	104,0434942	263,3213963

Рисунок 3.1 – Проміжний результат регресійного аналізу

Regression Statistics								
Multiple R	0,789529947							
R Square	0,623357538							
Adjusted R Square	0,581508375							
Standard Error	1724,715786							
Observations	31							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	3	132925032,6	44308344,2	14,8953408	6,46549E-06			
Residual	27	80315402,64	2974644,54					
Total	30	213240435,3						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
Intercept	-12639,45676	4320,206554	-2,9256603	0,006888708	-21503,7884	-3775,12511	-21503,7884	-3775,125111
X Variable 1	0,048250506	0,009230067	5,22753563	0,0000165332	0,029311972	0,06718904	0,029311972	0,06718904
X Variable 2	132,3886207	34,38463192	3,85022649	0,0006568782	61,83718363	202,9400578	61,83718363	202,9400578
X Variable 3	185,4241945	36,75544787	5,04480846	0,0000270011	110,008245	260,8401441	110,008245	260,8401441

Рисунок 3.2 – Кінцевий результат регресійного аналізу

Аналізуючи отримані результати розрахунків бачимо, що умова $P\text{-value} < 0,05$ виконується для всіх трьох факторів, з чого можна зробити висновок, що прийнятність для даних факторів можлива [27].

Для визначення значимості факторів, потрібно визначити значущість параметрів моделі. Перевіркою статистичної гіпотези про значущість параметрів моделі є перевірка припущення, що дані параметри суттєво відрізняються від нуля.

Вказані вище гіпотези перевіряємо за допомогою t -критерію Стюдента. Розраховане значення t -критерію $t_{\text{розрах}} (рис.3.2, t-Sat)$ порівнюємо зі значенням t -критерію, яке визначається за таблицею розподілу Стюдента і називається критичним $t_{\text{крит}} = 2,052$. Бачимо, що для всіх трьох факторів значення $t_{\text{розрах}}$ більше $t_{\text{крит}}$. З цього слідує, що основна гіпотеза про незначущість параметрів моделі регресії відкидається, тобто відповідні фактори визнаються значимими і залишаються в рівнянні регресії [27].

Отже рівняння лінійної регресії, яка являє собою математичну модель споживання електричної енергії системою постачання стисненого повітря, набуває наступного вигляду:

$$y = -12639,457 + 0,04825x_1 + 132,389x_2 + 185,424x_3;$$

де x_1 – об'єм виробництва стисненого повітря, м^3 ; x_2 – температура повітря, що надходить до системи, $^{\circ}\text{C}$; x_3 – вологість повітря, що надходить до системи, %.

3.4 Побудова довірчого інтервалу до математичної моделі споживання електроенергії

Будь-який метод дослідження має певну похибку. Встановлення базового рівня споживання електроенергії у вигляді рівняння регресії між витратою електричної енергії та факторами, які на неї впливають, не можна вважати абсолютно точним. З метою врахування похибки необхідно встановити довірчий інтервал: верхню та нижню межу. Завдання інтервального оцінювання полягає в наступному: побудова чисельного інтервалу за даними вибірки, відносно якого із заздалегідь вибраною ймовірністю можна вважати, що всередині даного інтервалу знаходиться оцінювана величина [22].

Оскільки математична модель споживання електроенергії також носить імовірнісний характер, тобто завжди буде мати деяку залишкову похибку, для контролю існуючого рівня ефективності використання електроенергії слід застосовувати базові рівні електроспоживання, побудовані у вигляді верхніх границь довірчих інтервалів, які визначаються для відповідних математичних моделей споживання електричної енергії. Для контролю ефективності впровадження заходів з енергозбереження на об'єктах порівняння дійсних рівнів споживання електричної енергії необхідно проводити з нижньою границею довірчого інтервалу для відповідної математичної моделі. Отже, зниження рівня ефективності споживання електричної енергії можна констатувати лише при умові знаходження фактичних значень електроспоживання вище верхньої границі довірчого інтервалу, а підвищення рівня енергоефективності – у випадку їх знаходження нижче нижньої границі вказаного інтервалу [22].

Для індивідуальних значень функції лінійної або нелінійної багатofакторної математичної моделі може бути побудований довірчий інтервал. Для індивідуального значення W_i з координатами $X_1(p)$, $X_2(p)$, ..., $X_n(p)$, одержаного на основі рівняння багатofакторної математичної моделі, довірчий інтервал у матричній формі згідно з [22] розраховується наступним чином:

$$W(p) = W_{\text{розн}}(p) \pm T_{\frac{\alpha}{2}, f_e} \frac{1}{n} S_e \sqrt{[X(p)]^T D [X(p)]}, \quad (3.5)$$

де $W_{\text{розн}}(p)$ – розрахункове значення витрат електроенергії, отримані за допомогою багатofакторного рівняння регресії; $T_{\frac{\alpha}{2}, f_e}$ – коефіцієнт розподілу Стюдента при двосторонній імовірності α і кількості ступенів свободи f_e ; S_e – середньоквадратичне відхилення індивідуальних значень фактичних витрат електроенергії від результатів моделювання за допомогою визначеного рівня регресії; $[X(p)]$ – матриця значень незалежних змінних (факторів), які

використовуються у математичній моделі; $[X(p)]^T$ – транспонована матриця $[X(p)]$; $[D]$ – коваріаційно-дисперсійна матриця вектора параметрів (констант) рівняння математичної моделі [22].

З метою врахування залишкового випадкового характеру зміни фактичних величин витрат електричної енергії в системі постачання стисненого повітря до отриманої математичної моделі визначимо верхню та нижню межу довірчих інтервалів за допомогою MS Excel. Результати розрахунків зведемо до таблиці 3.5.

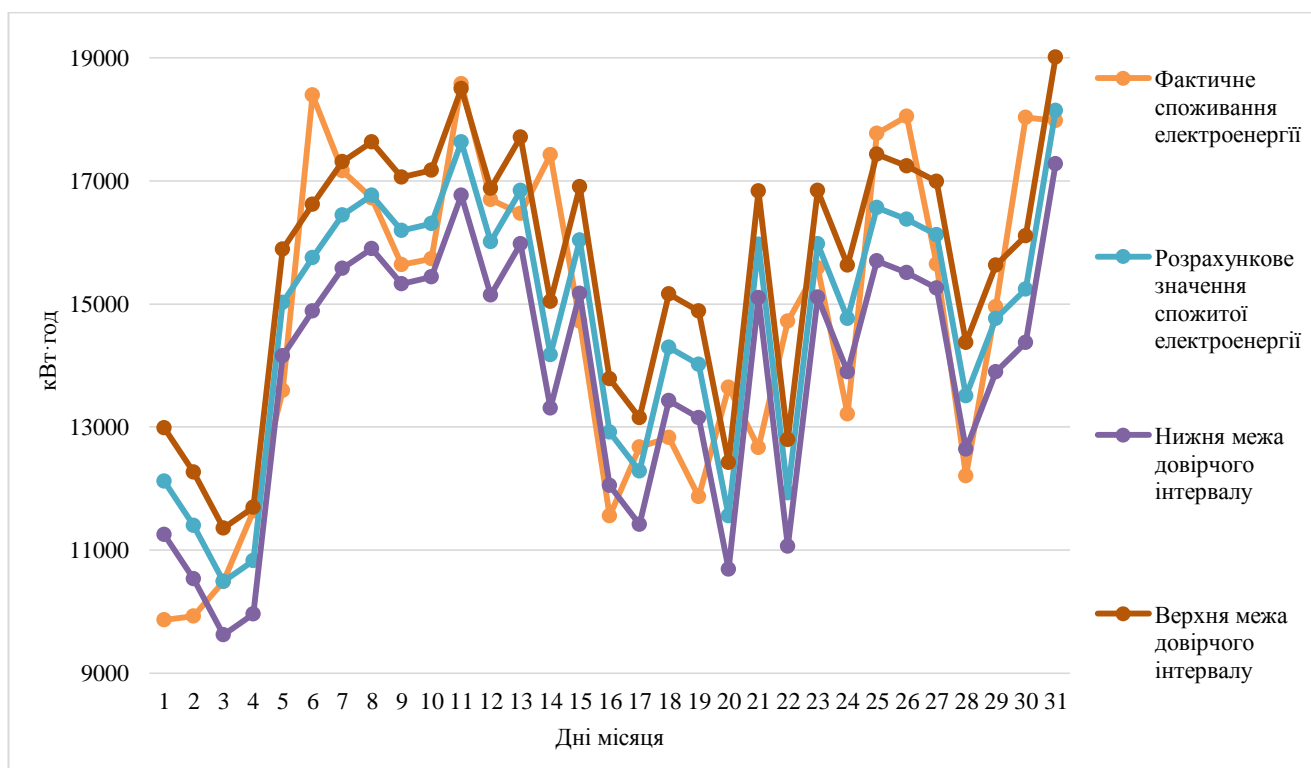
Таблиця 3.5

День місяця	Об'єми виробництва стисненого повітря, м ³	Температура повітря, що надходить до системи, С°	Вологість повітря, %	Споживання електроенергії, кВт·год	Розрахункове значення спожитої електроенергії, кВт·год	Середньоквадратичне відхилення	Довірчий інтервал	Нижня межа довірчого інтервалу	Верхня межа довірчого інтервалу
1	120129	20,0	88	9869,90	12121,930	2362,904	866,720	11255,210	12988,650
2	112885	20,0	86	9923,60	11401,555	2362,904	866,720	10534,835	12268,275
3	118641	18,0	81	10486,40	10487,386	2362,904	866,720	9620,666	11354,107
4	139947	10,0	83	11634,90	10827,151	2362,904	866,720	9960,431	11693,871
5	219149	10,0	85	13592,00	15019,536	2362,904	866,720	14152,816	15886,256
6	226530	10,0	87	18398,20	15746,522	2362,904	866,720	14879,801	16613,242
7	210235	10,0	95	17166,90	16443,673	2362,904	866,720	15576,953	17310,393
8	209281	10,0	97	16722,70	16768,491	2362,904	866,720	15901,770	17635,211
9	189594	10,0	99	15642,10	16189,431	2362,904	866,720	15322,711	17056,151
10	191935	10,0	99	15736,00	16302,386	2362,904	866,720	15435,666	17169,106
11	215672	17,0	95	18572,00	17632,731	2362,904	866,720	16766,011	18499,452
12	196800	20,0	89	16695,50	16006,769	2362,904	866,720	15140,049	16873,489
13	201521	19,0	93	16466,50	16843,867	2362,904	866,720	15977,147	17710,587
14	134633	19,0	96	17426,40	14172,760	2362,904	866,720	13306,040	15039,480
15	207910	19,0	87	14716,70	16039,595	2362,904	866,720	15172,875	16906,315
16	177721	19,0	78	11554,50	12914,142	2362,904	866,720	12047,422	13780,863
17	180014	19,0	74	12673,70	12283,084	2362,904	866,720	11416,364	13149,804
18	209079	25,0	73	12826,40	14294,393	2362,904	866,720	13427,672	15161,113
19	221941	35,0	61	11866,50	14013,786	2362,904	866,720	13147,066	14880,507

Продовження таблиці 3.5

20	159494	35,0	64	13644,70	11556,960	2362,904	866,720	10690,240	12423,680
21	176782	41,0	79	12665,20	15966,809	2362,904	866,720	15100,089	16833,529
22	181402	41,0	56	14715,20	11924,970	2362,904	866,720	11058,250	12791,690
23	207689	41,0	71	15582,00	15974,694	2362,904	866,720	15107,974	16841,414
24	167274	41,0	75	13208,60	14766,346	2362,904	866,720	13899,626	15633,067
25	197341	38,0	79	17771,70	16561,625	2362,904	866,720	15694,905	17428,345
26	197363	38,0	78	18044,60	16377,263	2362,904	866,720	15510,543	17243,983
27	186670	33,0	83	15648,70	16126,498	2362,904	866,720	15259,778	16993,218
28	120742	33,0	86	12206,50	13501,711	2362,904	866,720	12634,991	14368,431
29	117707	38,0	90	14952,30	14758,911	2362,904	866,720	13892,191	15625,631
30	146959	38,0	85	18026,80	15243,214	2362,904	866,720	14376,493	16109,934
31	184025	38,0	91	17975,20	18144,212	2362,904	866,720	17277,492	19010,932

Відобразимо базовий рівень електроспоживання та довірчий інтервал на рисунку 3.3.



Рисunek 3.3

3.5. Контроль рівня ефективності споживання електроенергії

Для відслідковування економії від впровадження заходів з підвищення рівня енергоефективності системи постачання стисненого повітря необхідно провести контроль встановленого рівня енергоефективності. Виконаємо це на прикладі заміни електродвигуна компресора.

Оскільки потреби підприємства у стисненому повітрі за останні роки значно знизились, а двигун застарів, то було запропоновано замінити старий двигун на новий енергоефективний двигун з меншою потужністю. Після впровадження даного заходу з підвищення рівня енергоефективності на підприємстві щоденно протягом місяця фіксувалися дані по споживанню електроенергії та значення параметрів, що на нього впливають. На основі зібраних даних із застосуванням встановленого раніше базового рівня споживання електричної енергії було визначено розрахункове значення споживання електроенергії та довірчий інтервал. Зібрані та розраховані дані зведемо до таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

День місяця	Об'єми виробництва стисненого повітря, м ³	Температура повітря, що надходить до системи, С°	Вологість повітря, %	Споживання електроенергії, кВт·год	Розрахункове значення спожитої електроенергії, кВт·год	Середньоквадратичне відхилення	Довірчий інтервал	Нижня межа довірчого інтервалу	Верхня межа довірчого інтервалу
1	128665	18,0	89	7123,30	12454,443	2362,904	866,720	11587,723	13321,163
2	147653	19,0	89	7801,40	13503,012	2362,904	866,720	12636,292	14369,732
3	126689	19,0	83	7123,50	11378,944	2362,904	866,720	10512,223	12245,664
4	146789	11,0	87	7941,30	12031,367	2362,904	866,720	11164,646	12898,087
5	215688	11,0	87	9812,10	15355,778	2362,904	866,720	14489,058	16222,498
6	197630	13,0	87	9341,20	14749,248	2362,904	866,720	13882,528	15615,968
7	196536	13,0	98	8956,30	16736,128	2362,904	866,720	15869,408	17602,848
8	210034	13,0	98	11400,80	17387,413	2362,904	866,720	16520,693	18254,133
9	178420	16,0	79	9092,10	12736,128	2362,904	866,720	11869,408	13602,848
10	198964	16,0	79	9427,10	13727,386	2362,904	866,720	12860,666	14594,106
11	223765	16,0	85	12473,10	16036,592	2362,904	866,720	15169,872	16903,312

Продовження таблиці 3.6

12	196896	20,0	89	10129,10	16011,401	2362,904	866,720	15144,681	16878,121
13	211529	20,0	94	13103,20	17644,571	2362,904	866,720	16777,851	18511,291
14	132349	20,0	94	8859,20	13824,096	2362,904	866,720	12957,376	14690,816
15	209710	18,0	92	12147,10	16921,178	2362,904	866,720	16054,458	17787,898
16	181721	18,0	77	9600,90	12789,332	2362,904	866,720	11922,612	13656,052
17	171014	18,0	77	9548,10	12272,713	2362,904	866,720	11405,993	13139,434
18	208029	22,0	75	12096,90	14217,412	2362,904	866,720	13350,692	15084,132
19	214941	30,0	68	11971,30	14312,059	2362,904	866,720	13445,339	15178,779
20	149884	41,0	67	9206,10	12443,877	2362,904	866,720	11577,157	13310,597
21	178882	41,0	67	11032,30	13843,045	2362,904	866,720	12976,325	14709,765
22	201402	30,0	59	10082,20	11989,978	2362,904	866,720	11123,258	12856,698
23	187677	39,0	59	10535,90	12519,237	2362,904	866,720	11652,517	13385,957
24	188274	39,0	78	10456,30	16071,102	2362,904	866,720	15204,382	16937,823
25	177347	38,0	78	9635,70	15411,481	2362,904	866,720	14544,760	16278,201
26	187762	38,0	78	9969,60	15914,010	2362,904	866,720	15047,289	16780,730
27	175570	30,0	88	8451,70	16120,872	2362,904	866,720	15254,152	16987,592
28	140941	30,0	85	7931,50	13893,733	2362,904	866,720	13027,013	14760,453
29	159907	39,0	92	9786,90	17298,319	2362,904	866,720	16431,599	18165,039
30	136959	39,0	92	8698,90	16191,066	2362,904	866,720	15324,346	17057,787
31	164079	30,0	90	8894,20	15937,274	2362,904	866,720	15070,554	16803,994

Відобразимо базовий рівень електроспоживання, довірчий інтервал та фактичне споживання після впровадження заходу з підвищення рівня енергоефективності на рисунку 3.4.

З представленого графіка бачимо, що лінія фактичного споживання електроенергії після встановлення нового двигуна у всіх точках контролю знаходиться нижче нижньої межі довірчого інтервалу базового рівня електроспоживання. Це вказує на те, що передбачувана економія від впровадження заходу з енергозбереження виконується.

Разом з тим контроль ефективності використання електроенергії може здійснюватися за допомогою графіку CUSUM [22], так званої кумулятивної суми. Даний графік показує характер зміни у часі результатів енергозбереження фактично досягнутих на об'єкті.

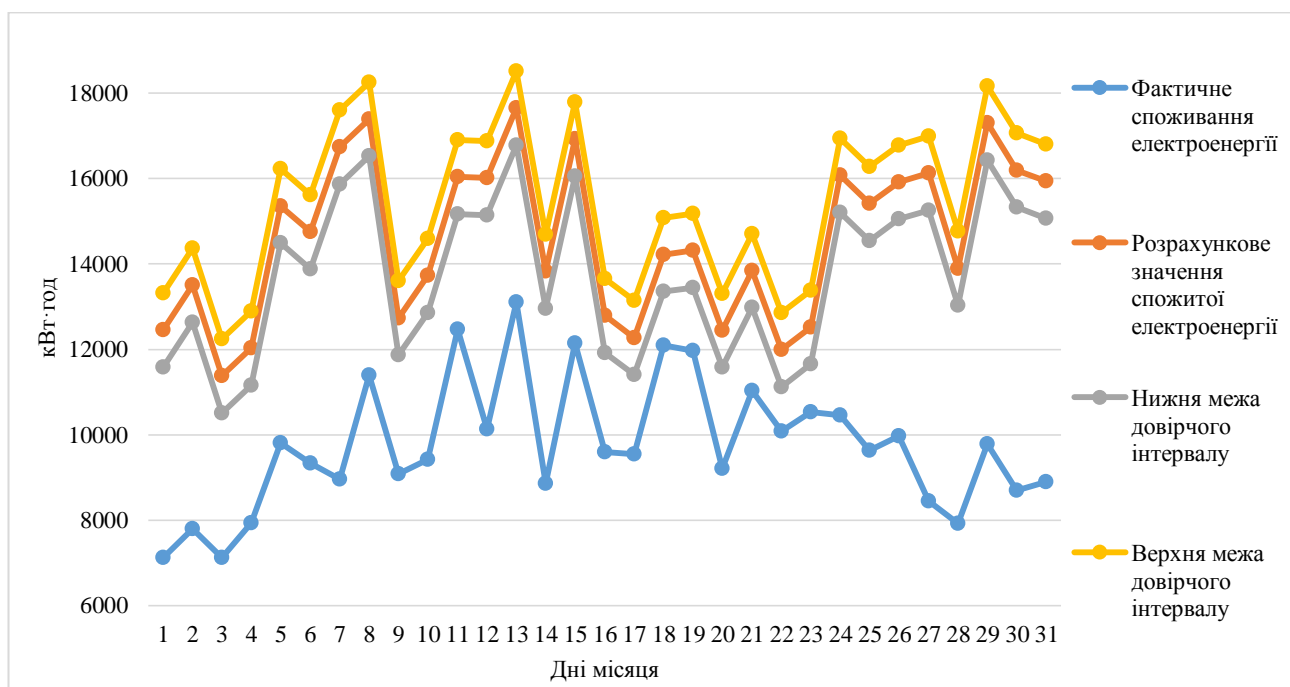


Рисунок 3.4

Побудова графіка CUSUM базується на покроковому визначенні та накопиченні відхилень, які виникають між фактичними та отриманими на основі відповідного базового рівня обсягами електроспоживання на об'єкті. При цьому величина відхилення фактичного обсягу споживання електроенергії відносно встановленого базового рівня для деякого i -того періоду буде рівна [22]:

$$DW_i = W_{\text{факт.}i} - W_{\text{прогноз.}i}; \quad (3.4)$$

де $W_{\text{факт.}i}$ - фактичний обсяг споживання електроенергії за відповідний період;
 $W_{\text{прогноз.}i}$ - прогнозна величина електроспоживання з той же період, визначена за встановленим базовим рівнем.

Розрахунок значення кумулятивної суми відхилень фактичного споживання електроенергії DW_i на k -му кроці контролю виконання встановленого базового рівня електроспоживання виконується за формулою [22]:

$$DW_{e\ k} = \sum_{i=1}^k DW_i = DW_{e\ k-1} + DW_k; \quad (3.4)$$

де $DW_{e\ k}$ - сумарне відхилення споживання електроенергії від його базового рівня отримане протягом минулих k періодів контролю; DW_i - відхилення споживання електроенергії від базового рівня на i -му кроці контролю; $DW_{e\ k-1}$ - сумарне відхилення фактичних обсягів споживання електроенергії від базового рівня, отримане протягом минулих $k-1$ періодів контролю; DW_k - відхилення споживання електроенергії від базового рівня на k -му кроці контролю;

За приведеною вище методикою за допомогою MS Excel розрахуємо значення кумулятивної суми відхилень фактичного споживання електроенергії на кожному кроці контролю. Результати розрахунків зведемо до таблиці 3.7

Таблиця 3.7

Споживання електроенергії	Розрахункове значення спожитої електроенергії	ΔW_i	$\Delta W_{\Sigma k}$
7123,30	12454,443	-5331,143	-5331,143
7801,40	13503,012	-5701,612	-11032,755
7123,50	11378,944	-4255,444	-15288,199
7941,30	12031,367	-4090,067	-19378,266
9812,10	15355,778	-5543,678	-24921,944
9341,20	14749,248	-5408,048	-30329,991
8956,30	16736,128	-7779,828	-38109,819
11400,80	17387,413	-5986,613	-44096,433
9092,10	12736,128	-3644,028	-47740,460
9427,10	13727,386	-4300,286	-52040,747
12473,10	16036,592	-3563,492	-55604,239
10129,10	16011,401	-5882,301	-61486,540
13103,20	17644,571	-4541,371	-66027,911
8859,20	13824,096	-4964,896	-70992,807
12147,10	16921,178	-4774,078	-75766,885
9600,90	12789,332	-3188,432	-78955,317
9548,10	12272,713	-2724,613	-81679,930
12096,90	14217,412	-2120,512	-83800,442
11971,30	14312,059	-2340,759	-86141,201
9206,10	12443,877	-3237,777	-89378,978
11032,30	13843,045	-2810,745	-92189,723

Продовження таблиці 3.7

10082,20	11989,978	-1907,778	-94097,500
10535,90	12519,237	-1983,337	-96080,838
10456,30	16071,102	-5614,802	-101695,640
9635,70	15411,481	-5775,781	-107471,420
9969,60	15914,010	-5944,410	-113415,830
8451,70	16120,872	-7669,172	-121085,002
7931,50	13893,733	-5962,233	-127047,235
9786,90	17298,319	-7511,419	-134558,654
8698,90	16191,066	-7492,166	-142050,821
8894,20	15937,274	-7043,074	-149093,895

На основі розрахованих даних побудуємо графік кумулятивної суми (рис.3.5). Візуально оцінивши загальну тенденцію зміни у часі величини кумулятивної суми можна сказати, що очікувана економія відбувається, оскільки на кожному кроці контролю величина DW_{e_k} є від'ємною.

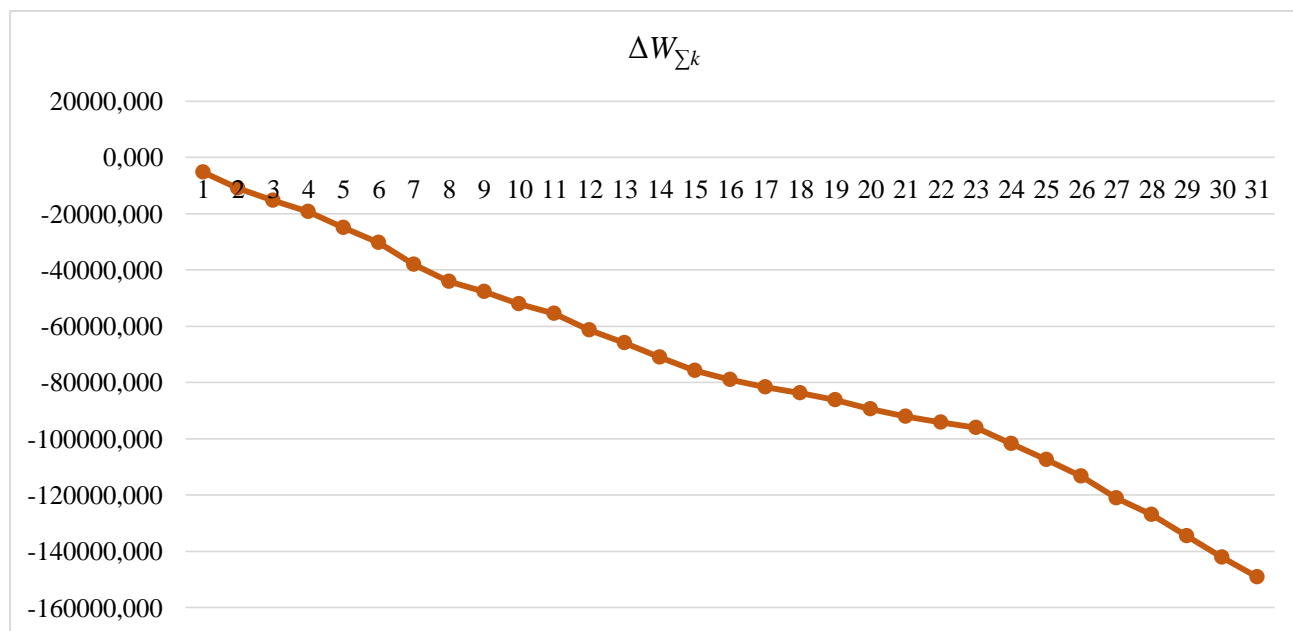


Рисунок 3.5 - Графік кумулятивної суми

Отже, виходячи з проведеного вище дослідження, алгоритм процедури контролю рівня енергоефективності можна відобразити на схемі (рис.3.6).



Рисунок 3.6 - Алгоритм процедури контролю рівня енергоефективності

Висновки до розділу

1. Розглянуто традиційні системи контролю і планування, досліджено основні методи попереднього відбору факторів для побудови математичної моделі. За допомогою експертного оцінювання здійснено відбір факторів, що мають найбільший вплив на величину електроспоживання.

2. За допомогою регресійного аналізу встановлено базовий рівень споживання електроенергії та проведений контроль досягнутого рівня енергоефективності після впровадження заходу з енергозбереження. За допомогою графіка кумулятивної суми відслідковано характер зміни у часі результатів впровадження заходу з енергозбереження.

3. За результатами розрахунків можна зробити висновок, що в результаті заміни двигуна компресора запланована економія електроенергії відбулася.

4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

4.1 Етапи розроблення стартап-проекту

Стартап - це така компанія (проект), що має амбітну, інноваційну ідею і перспективний продукт. В основному стартапом називають молоді фірми і мобільні підприємства з обмеженими ресурсами, які були створені недавно або ще знаходяться в стадії заснування і розвитку [32]. Згідно з [32] розробка стартап-проекту здійснюється в чотири етапи (рисунок 4.1). Цю систему було обрано для подальшої розробки стартап-проекту за темою магістерської дисертації.



Рисунок 4.1 - Етапи розроблення стартап-проекту [32]

4.2 Опис ідеї проекту та визначення загального напрямку використання

Ідея проекту полягає у створенні компанії, яка буде проводити оцінювання та контроль досягнутого рівня енергоефективності після впровадження заходів з енергозбереження в системах постачання стисненого повітря. Контроль виконується за запропонованим в третьому розділі алгоритмом.

Основними споживачами послуги яку надаватиме створена компанія є організації та підприємства, які використовують у своїй діяльності системи постачання стисненого повітря та яким необхідно провести оцінку ефективності введення заходів з енергозбереження.

Опис ідеї стартап-проекту наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Опис ідеї стартап-проекту

Опис ідеї	Напрямки застосування	Вимоги до користувача
Аналіз ефективності впровадження заходів з енергозбереження в системах постачання стисненого повітря.	Комерційний – надання послуг промисловим підприємствам.	- Наявність системи обліку електроенергії; - Надання доступу до інформації; - Надання доступу до проведення необхідних вимірювань.

В таблиці 4.2 наведено аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів

Таблиця 4.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари / концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2			
1	Надійність системи	1	2	3		2,3	1
2	Сучасність	1	2	3		1,2	3

Продовження таблиці 4.2

3	Комплексність	1	2	3	2	3	1
4	Оперативність	1	2	3		1,2,3	
5	Достовірність	1	2	3		1,2	3
6	Надійність системи	1	2	3		1,2	3

Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності [32].

4.3 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного етапу проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту.

Визначення технологічної здійсненності проекту представлено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 Технологічна здійсненність ідеї проекту

№, п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Оцінка та аналіз споживання електроенергії	Відбір факторів, що впливають на споживання електроенергії за методом експертних оцінок. Аналіз отриманих результатів	наявна	доступна
2	Встановлення базового рівня споживання електроенергії	Розробка моделі, побудова базового рівня споживання електроенергії та встановлення довірчого інтервалу з використанням MS Excel	наявна	доступна
3	Контроль ефективності використання електроенергії	Здійснення контролю споживання електроенергії за побудови графіку кумулятивної суми з використанням програмного забезпечення MS Excel	наявна	доступна

Отже, проект можливо реалізувати, усі необхідні технологічні ресурси є наявними та доступними.

4.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В даному розділі визначено ринкові можливості, що можуть бути використані під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту. Сплануємо напрями розвитку проекту з урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів конкурентів [32].

Аналіз динаміки та розвитку попиту на проект проведено та представлено результат у таблиці 4.4

Таблиця 4.4 -Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№, п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	14
2	Загальний обсяг продаж, грн./ум. од	550 тис грн
3	Динаміка ринку	зростає
4	Наявність обмежень для входу	Обмежений. Дана система ще не використовується в Україні на необхідному рівні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Стандарт ISO - 50001
6	Середня норма рентабельності в галузі, %	10 %

Визначення групи потенційних клієнтів, їх характеристики, та орієнтовний перелік вимог до послуги наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№, п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Контроль ефективності споживання електроенергії (підвищення рівня енергетичної ефективності)	промислові підприємства	Не передбачено	Надійність, ефективність, доступність

Аналіз ринкового середовища з точки зору загроз та можливостей представлено у таблицях 4.6 – 4.7.

Таблиця 4.6- Фактори загроз

№, п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Неточність результатів	наявність похибки	проведення додаткових розрахунків; можливість застосування іншого методу
2	Конкуренція	наявність товарів-замінників	реклама; впровадження системи лояльності
3	Попит	відсутність попиту; спроможність підприємства самостійно здійснювати аналіз та контроль	реклама

Таблиця 4.7 - Фактори можливостей

№, п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	новизна	застосування нових, більш точних методів оцінки та аналізу споживання електроенергії	витрати на вдосконалення програмного забезпечення
2	комплексність	комплексний підхід до аналізу споживання електроенергії, вибору впливових факторів, побудови базової лінії та встановлення довірчого інтервалу.	вдосконалення складової
3	вдосконалення моделей	застосування нових методів	підвищення конкурентоспроможності

Загальні риси конкуренції на ринку представлені у таблиці 4.8

Таблиця 4.8 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства(можливі дії компанії, щоб бути конкурентноспроможною
тип конкуренції: - чиста	Велика кількість підприємств даного профілю	Надання більш якісних послуг; залучення висококваліфікованих спеціалістів
Локальний рівень конкурентної боротьби	Діяльність компанії спрямована на місцевого споживача, конкурувати за кордоном не рентабельно	Конкуренція в галузі впливає на попит. Можливими діями компанії є підтвердження якості наданих послуг, застосування програми лояльності, реклама

Продовження таблиці 4.8

Галузева ознака: - внутрішньогалузева	Компанія надає послуги лише в енергетичній галузі	Вихід компанії на новий рівень. Розширення напрямків застосування методів в інших галузях
Конкуренція за видами послуг: - консультативна; - продуктова.	Надання консультації підприємств з питань управління та контролю споживання електроенергії. Побудова моделі.	Підвищення кваліфікації персоналу. Вдосконалення та впровадження нового програмного забезпечення.
За характером конкурентних переваг - нецінова	Послуга не має фіксованої ціни. Розрахунок вартості залежить від типу заявлених робіт та складності виконання.	На ціну впливає велика кількість факторів.
За інтенсивністю - не марочна	На багатьох підприємствах вже працюють певні системи аналізу та контролю. Також наявна конкуренція на ринку.	Жорстка конкуренція

Детальний аналіз умов конкуренції в галузі наведені в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Клієнти	Товари-замінники
Висновки:	Інші компанії, які надають послуги з оцінки та контролю споживання електроенергії	Вихід на ринок нових конкурентів.	Впровадження на підприємстві системи оперативного контролю	Розробка та застосування вдосконаленого програмного забезпечення

На основі аналізу конкуренції, наведеного в таблиці 4.9, а також з врахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 4.2), вимог споживачів до товару (табл. 4.5) та факторів маркетингового середовища (табл. 4.6 - 4.7) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності (табл. 4.10) [32].

Таблиця 4.10 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№, п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Новизна	Комплексний підхід та застосування базового рівня електроспоживання з встановленням довірчого інтервалу
2	Якість	Методи, що використовуються при виконанні аналізу є досить точними.
3	Термін виконання робіт	Досить швидке виконання аналізу.

Аналіз сильних та слабких сторін проекту представлено у таблиці 4.11. Аналіз здійснено на основі аналізу таблиці 4.10.

Таблиця 4.11- Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін з компанією конкурентом

№, п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг послуг у порівнянні з іншою компанією-конкурентом						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Новизна	5						V	
2	Точність та якість	7					V		
3	Термін виконання робіт	4			V				
4	Ціна	6					V		
5	Інформаційне забезпечення	5			V				

Заключним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 4.12) на основі

виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 4.11).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складено на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення [32].

Таблиця 4.12 - SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ul style="list-style-type: none"> - високий попит на підвищення енергоефективності; - точність результатів аналізу; - інформаційне забезпечення; - контроль якості; - швидкість виконання робіт; - кваліфікація розробників моделей. 	<ul style="list-style-type: none"> - складність використання програмного забезпечення; - невелика команда розробників моделей.
Можливості	Загрози
<ul style="list-style-type: none"> - підвищення точності; - вдосконалення моделей; - застосування нових методів; - лояльність цін. 	<ul style="list-style-type: none"> - наявність похибки; - патенти на продукти; - конкуренція, наявність товарів-замінників; - законодавчі обмеження; - відсутність попиту.

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок (табл. 4.10) [32].

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту представлено в таблиці 4.13.

Таблиця 4.13 - Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Спільна робота з іншими підприємствами	Середня	1 рік

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Розробка ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.14) [31].

Таблиця 4.14 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти послуги	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Промислові підприємства	Висока	Високий	Висока	Середня
2	Інші підприємства	Помірна	Середній	Середня	Помірна
3	Адміністративні будівлі	Низька	Слабкий	Помірна	Низька
Обрано: промислові підприємства					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів (сегментів) обрано цільову групу, для якої пропонується надання послуг. Для роботи в обраному сегменті ринку сформовано базову стратегію розвитку (табл. 4.15) [32]..

Таблиця 4.15 - Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Стратегія спеціалізації	Концентрація на потребах одного цільового сегменту	Точність, якість, комплексність, оперативність надання послуги. Сучасне програмне забезпечення. Висококваліфікований персонал.	Концентрований маркетинг

Зробимо вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16).

Таблиця 4.16 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики послуги конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні	Компанія буде здійснювати пошук нових споживачів та створюватиме конкуренцію на ринку	Так. Здійснення оцінки та контролю споживання електроенергії.	Якість послуг, висока точність результатів.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до стартап-компанії та до продукту (табл. 4.5), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (табл. 4.15) та стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16) розроблено стратегію позиціонування (табл. 4.17) [32].

Таблиця 4.17 - Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до послуги цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
1	Досягнення очікуваного результату	Покращення та реклама	Новизна, унікальність, комплексність.	Інтелектуальний; ефективний, результативний.

Ідея проекту полягає у створенні компанії, яка буде проводити оцінювання та контроль досягнутого рівня енергоефективності після впровадження заходів з енергозбереження в системах постачання стисненого повітря. Контроль виконується за запропонованим в третьому розділі алгоритмом.

Основними споживачами послуги, яку надаватиме створена компанія, є організації та підприємства, які використовують у своїй діяльності системи постачання стисненого повітря та яким необхідно провести оцінку ефективності введення заходів з енергозбереження.

Висновки до розділу

1. Розроблено стартап-проект на основі виконаних досліджень. Ідея проекту полягає у створенні компанії, яка буде проводити оцінювання та контроль досягнутого рівня енергоефективності після впровадження заходів з енергозбереження в системах постачання стисненого повітря.

2. Вииконано аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту та розроблено маркетингову програму стартап-проекту.

3. Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї проекту в порівнянні з пропозиціями конкурентів визначив сильні, слабкі та нейтральні характеристики ідеї проекту, що стало підґрунтям для визнання ідеї

конкурентоспроможною. Визначено можливі дії компанії для підвищення конкурентоспроможності. Розроблено стратегії ринкового впровадження проекту.

ВИСНОВКИ

Основні результати і висновки дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Розглянуто загальну характеристику систем постачання стисненого повітря та види компресорів, визначено, що система включає в себе наступні основні компоненти: виробництво стисненого повітря; зберігання стисненого повітря; підготовка стисненого повітря; розподіл стисненого повітря.

2. Проаналізовано та досліджено основні існуючі заходи з підвищення рівня енергоефективності в системах постачання стисненого повітря. В результаті аналізу виявлено, що найбільший потенціал енергозбереження пов'язаний зі скороченням витоків стисненого повітря, оскільки саме витoki призводять до ряду інших виробничих втрат, такі як втрати тиску в системі, передчасний знос обладнання, необгрунтоване збільшення потужності компресора.

3. Досліджено схему постачання стисненого повітря хімічного підприємства та розраховано її основні параметри. На основі отриманих результатів розрахунків були запропоновані до впровадження заходи з підвищення рівня енергоефективності, а саме: заміна редуктора в системі двигун-компресор, використання холодного зовнішнього повітря для живлення компресора, встановлення сучасного енергоефективного електродвигуна з меншою потужністю, утилізація теплоти, яка виділяється при виробництві стисненого повітря, усунення витоків стисненого повітря в системі.

4. Визначено, що найбільша економія електричної енергії очікується від заміни двигуна компресора, оскільки потреби у стисненому повітрі з часів проектування компресорної станції значно знизилися і для заміни був обраний двигун з потужністю у два рази меншою від встановленого.

5. Досліджено основні методи попереднього відбору факторів для побудови математичної моделі. За методом експертного оцінювання здійснено відбір впливових факторів. За допомогою регресійного аналізу встановлено базовий рівень споживання електроенергії та проведений контроль досягнутого

рівня енергоефективності після впровадження заходу з енергозбереження. За проведеними розрахунками визначено, що в результаті заміни двигуна компресора запланована економії електроенергії відбулася.

6. Розроблено стартап-проект на основі виконаних досліджень. Ідея проекту полягає у створенні компанії, яка буде проводити оцінювання та контроль досягнутого рівня енергоефективності після впровадження заходів з енергозбереження в системах постачання стисненого повітря. Виконано аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту. Групою потенційних клієнтів визначено промислові підприємства. Визначено можливі дії компанії для підвищення конкурентоспроможності.. Розроблено стратегії ринкового впровадження проекту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кузнецов Ю.В., Кузнецов М.Ю. Сжатый воздух — Екатеринбург: УрО РАН, 2007. — 511 с.
2. Калинин Н.В., Кабанова И.А., Галковский В.А., Костюченко В.М. Системы воздухообеспечения промышленных предприятий — Смоленск, 2005. —122с.
3. Блейхер И.Г., Лисеев В.П. Компрессорные станции — Издательство «Машгиз», 1959. - 323 с.
4. Системы сжатого воздуха, [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://usp.kiev.ua/articles/85/sistemy-szhatogo-vozduha-133/>
5. А.В. Праховник, О.М. Суходоля, С.П. Денисюк, В.В. Прокопенко Энергозбереження в промисловості Частина 2. Енергетичне обладнання: навч. посіб. — Київ, 2012 — 228 с.
6. Енергозбереження при виробництві стисненого повітря., [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://um.co.ua/8/8-2/8-216648.html>
7. Прокопенко В.В., Закладний О.О., Гребенюк Т.В., Домбровський Т.В. Енергетичний аудит систем стисненого повітря: Метод. вказівки до лабораторної роботи № 3 з дисципліни «Енергетичний аудит» – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 45 с.
8. Дыскин Л.М., Осипов Ю.В. Воздухообеспечение производственного предприятия — Нижний Новгород: ННГАСУ, 2010. - 52 с.
9. Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б. Экономия энергии в промышленности. Учебное пособие. – Н. Новгород: НГТУ, 1997.
10. Энергоэффективные мероприятия, [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://usp.kiev.ua/technology/Energysaving_measures/
11. Г.Г. Леонт'єв, В.І.Дешко, В.В.Дубровська, О.В. Ленькин, Розрахунок системи постачання стисненого повітря промислової дільниці: Метод. вказівки до виконання розрахункової роботи з курсу „Системи виробництва та розподілу енергії” – К.: ІВЦ, Видавництво ”Політехніка”, 2004.- 33 с.

12. Энергосбережение при производстве и распределении сжатого воздуха, [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://knowledge.allbest.ru/physics/2c0b65625a2bd69b4c53b89421316d36_0.html
1
13. Compressed Air Leak Survey & System Energy Audit Report , [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.permaweld.com/compressed-air-survey-and-system-audit-report.html>
14. Хошимов Ф. А., Аллаев К. Р., Энергосбережение на промышленных предприятиях, – Ташкент, Из-во «Фан», 2011 г., 209 с.
15. Расулов А. Н., Рахмонов И. У. Мероприятия по экономии электроэнергии на компрессорных станциях [Текст] // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы II Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, апрель 2014 г.). — СПб.: Заневская площадь, 2014. — С. 55-57.
16. Аракелов В. Е. Комплексная оптимизация энергоустановок промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат ,1984 г. – 80 с.
17. Копытов Ю.В. Экономия электроэнергии в промышленности. Справочник. – М.: Энергия, 1978. – 120 с.
18. Праховник А.В. Контроль ефективності енерговикористання – ключова проблема управління енергозбереженням / А.В. Праховник, В.Ф. Находов, О.В. Бориченко // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2009. – №8(66). – С. 41–54.
19. Pooley John. Quick Start Guide to Energy Monitoring & Targeting (M&T) [Электронный ресурс] / John Pooley // Effective Energy Management Guide. – 2005. – Режим доступа : <http://www.oursouthwest.com/SusBus/susbus9/m&tguide.pdf>.
20. ДСТУ ISO 50001:2014 Енергозбереження. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання (ISO 50001:2011, IDT) – [Чинний від 16.09.2014]. – (Державний стандарт України).
21. ДСТУ ISO 50006:2016 Системи енергетичного менеджменту. Вимірювання рівня досягнутої енергоефективності з використанням базових рівнів

- енергоспоживання та показників енергоефективності. Загальні положення і настанова (ISO 50006:2014, IDT) – [Чинний від 01.09.2016]. – (Державний стандарт України).
22. Бориченко О.В. Інтегрована система контролю ефективності використання електричної енергії у виробництві : дис. На здоб. вч. ступеня канд. техн. наук : 05.14.01 / Бориченко Олена Володимирівна. – К., 2011. – 196 с.
 23. Фрейдкина Е.М. Методы и критерии оценки эффективности энергосбережения: учебное пособие / СПбГТУРП. СПб., 2013. – 52 с.
 24. Шаюхов Т.Т. Математическое моделирование влияния внешних факторов на параметры электропотребления // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №5 (2017).
 25. Методы отбора существенных факторов модели, [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://econtool.com/metodyi-otbora-sushhestvennyih-faktorov-modeli.html>
 26. Методичні рекомендації до виконання розрахункової роботи кредитного модуля «Маркетингові дослідження в енергетиці» / Уклад. : А. І. Замулко, Ю. В. Чернецька, Ю. А. Веремійчук. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 65 с.
 27. Методичні вказівки до виконання курсової роботи за темою: «Регресійний аналіз в задачах систем енергетичного менеджменту» / Уклад. Стрелкова Г.Г.. – К. : НТУУ «КПІ», 2017. – 16 с.
 28. Бешелев С.Д. Математико-статистические методы экспертных оценок / С.Д. Бешелев, Ф.Г. Гурвич. – М.: Статистика, 1980. – 263 с.
 29. Усихин, В. Н. О нормировании и планировании электропотребления на промышленных предприятиях / В.Н. Усихин // Промышленная энергетика. – 1997. - № 4. – С. 30 – 37.
 30. Находов В.Ф. Контроль та аналіз виконання встановлених «стандартів» в системах статистичного контролю ефективності використання електричної енергії / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко // «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро : інформ. зб. – 2011. – № 2. – С. 16–23.

31. Бланк, С. Стартап. Настольная книга основателя / С. Бланк, Б. Дорф ; пер. с англ. Т. Гутман, И. Окунькова, Е. Бакушева. – 2-е изд. – Москва : Альпина Паблишер, 2014. – 614 с.
32. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016.
33. Мельников, В.М. Обработка экспертных оценок для построения весовых функций мероприятий по энергосбережению/ В.М. Мельников, В.С. Мокроусов // Научные аспекты инновационных исследований. Том I. - Самара: ООО «Инсома- пресс». 2013.-С. 35-38.
34. Бешелев С.Д. Экспертные оценки в принятии плановых решений / С. Бешелев, Ф. Гурвич.-М.: Экономика, 1976. 287с
35. J. Pooley. (2005). Quick Start Guide to Energy Monitoring & Targeting (M&T)[Online].Available:<http://www.oursouthwest.com/SusBus/susbus9/m&tguide.pdf>.
36. Находов В.Ф. Вибір чинників для побудови математичних моделей електроспоживання виробничих об'єктів [Електронний ресурс] / В.Ф. Находов, І.О. Єгорова, О.П. Тітарчук // Збірник наукових праць Енергетика. Екологія. Людина : VII міжнар. наук.-техн. конф. молодих дослідників, аспірантів та студентів, 27–29 травня 2015 р. – К., 2015.
37. Бараннік В.О. Ефективність енергоспоживання в державі як індикатор конкурентоспроможності. Міждержавні співставлення [Текст] / В.О. Бараннік // Научно-технический сборник. – 2008. – №88. – С.14-18.
38. Н.Дрейпер, Г.Смит. Прикладной регрессионный анализ. Пер. с англ. Т.2. М., Финансы и статистика, 1987.
39. Мордэкэй Е., Карл А.Фокс. Методы анализа корреляций и регрессий линейных и криволинейных. Пер. с англ. М., Статистика, 1966.
40. Е.И. Пустыльник. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М., Наука, 1968.

41. Экспертные оценки в научно-техническом прогнозировании / Г.М. Добров, Ю.В. Ершов и др./ Отв. ред. В.С. Михалевич, К., Наукова думка, 1974.
42. Энергоаудит. Сборник практических и научно-методических материалов / Под ред. К.Г. Кожевникова, А.Г. Вакулко – «Энергосбережение» - Москва, 1999, 223 с.